

Optimierung von Datenströmen zwischen Frontend und Backend: gRPC im Vergleich zu REST und GraphQL

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering (BSc)

eingereicht am

Fachhochschul-Studiengang **Mobile Software Development**

FH JOANNEUM (University of Applied Sciences), Kapfenberg

Betreuer/in: DI MA Michael Ulm

Eingereicht von: Michael Mühlberger

Juni 2025

Abstract

Your text here... [TODO: Write the abstract in English and in German, called *Zusammenfassung*. Describe in about 250 to 350 words the problem, the innovation, the method, the results and implications.]

Zusammenfassung

Ihr Text beginnt hier... [TODO: Die Zusammenfassung test test test sollte das gesamte Werk enthalten, also das spannende Problem, den gewählten – neuartigen – Lösungsansatz und natürlich vor allem die erreichten Resultate.]

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsfragen	2
1.3 Hypothese	2
1.4 Methodik	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Frontend und Backend	4
2.2 Serialisierungsformate	4
2.3 Transportprotokolle	7
2.4 API-Technologien	8
2.5 Begriffe	14
3 Stand der Technik	15
3.1 Industrielle Standards	15
3.2 Ähnliche Arbeiten	18
4 Theoretische Analyse und Vergleich der API-Technologien:	21
4.1 Theoretische Analyse und Vergleich der API-Technologien:	21
5 Entwicklung und Umsetzung des Prototyps	27
5.1 Versuchsaufbau	28
5.2 Implementierung:	31
5.3 Spezifikationen des Testsystems	38
5.4 Messung	39
6 Diskussion und Ausblick	49
6.1 Diskussion	49
6.2 Zusammenfassung	49
6.3 Ausblick	49

Literaturverzeichnis	52
A Anhang	55
A.1 Rohdaten der Messungen	55

Abbildungsverzeichnis

2.1	3-Way Handshake (for establishing TCP connection)	7
5.1	Daten	31

Tabellenverzeichnis

5.1	Verwendete Technologien	34
5.2	Verwendete Frontend-Technologien	36
5.3	Verwendete Technologien des Konsolen-Clients	37
5.4	Chrome-Client – Einzel-Requests: Durchschnitt und Median (Antwortzeit in ms)	40
5.5	Chrome-Client – 20 parallele Requests: Durchschnitt und Median (Antwortzeit in ms)	42
5.6	Vergleich WebClient (1 Request) – Chrome, Firefox, Edge (AVG in ms)	44
5.7	Konsole – 1 Request: Durchschnitt und Median (Antwortzeit in ms)	46
A.1	Rohdaten: Web-Client Einzelrequests – Chrome (Antwortzeit in ms; 30 Messungen je Kombination)	56
A.2	Rohdaten: Web-Client <i>20 parallele Requests</i> – Chrome (Antwortzeit in ms; bis zu 30 Messungen je Kombination)	57
A.3	Rohdaten: Web-Client Einzel-Request Firefox (Antwortzeit in ms; 10 Messungen je Kombination)	58
A.4	Rohdaten: Web-Client Einzel-Request Edge (Antwortzeit in ms; 10 Messungen je Kombination)	58
A.5	Rohdaten: Konsolen-Client (Microservice) – Einzel-Requests (Antwortzeit in ms; 10 Messungen je Kombination)	59

Einleitung

1.1 Motivation

Bei Echtzeitanwendungen wie Chat-Applikationen oder Streaming Diensten werden oft große Datenmengen ausgetauscht. Dabei ist eine effiziente Übertragung der Daten essenziell, damit die Latenz so klein wie möglich bleibt. Eine Methode um dies in einem Softwareprojekt zu implementieren ist das gRPC Framework, indem die Daten binär kodiert mittels dem http/2 Protokoll übertragen werden. Während sich diese Strategie für Datenströme in Backend-Architekturen und insbesondere in Microservice-Umgebungen bereits etabliert haben, ist eine nahtlose Implementierung von gRPC in Frontend-Anwendungen in Web-Browsern noch nicht möglich. Hauptgrund dafür, sind fehlende HTTP/2-Features in den Browsern (z. B. bidirektionales Streaming) welche eine Voraussetzung für eine Implementierung von gRPC darstellen. Eine Abhilfe dafür ist gRPC-Web, eine angepasste Variante von gRPC, die dafür entwickelt wurde, gRPC auch in Webbrowsern nutzbar zu machen. Während durch die Verwendung von gRPC-Web einige Features verloren gehen, bleiben auch wichtige Vorteile, wie etwa die Nutzung von Protocol Buffers, erhalten. In der Praxis wird eine gRPC-Übertragung in der Regel nur verwendet, wenn eine effiziente und schnelle Kommunikation besonders wichtig ist. Ziel der Bachelorarbeit ist es zu untersuchen, inwiefern sich gRPC beziehungsweise gRPC-Web auch in Frontend-Anwendungen sinnvoll einsetzen lassen. Hierfür werden verschiedene API - Übertragungstechnologien, welche sich bereits in der Frontend- zu Backendkommunikation etabliert haben mit gRPC und gRPC-Web überprüft und verglichen. Der Schwerpunkt liegt auf den Kriterien Latenz, Effizienz und den generellen Vor- und Nachteilen die beim Einsatz der jeweiligen Technologien zum Vorschein kommen. Die Bewertung erfolgt sowohl auf theoretischer Grundlage

als auch anhand einer praktischen Untersuchungen.

1.2 Forschungsfragen

Aus der dargestellten Situation und den Einbußen welche mit der Implementierung von gRPC in Webanwendungen einhergehen, ergibt stellt sich die Motivation, die gRPC / gRPC-Web mit den etablierten API-Ansätzen für die Frontend- zu Backendkommunikation zu vergleichen. Um eine diesbezügliche Eignung von gRPC bzw. gRPC-Web feststellen zu können, werden im Rahmen der Bachelorarbeit folgende Forschungsfragen untersucht:

- Wie wirkt sich die Verwendung von gRPC bzw. gRPC-Web im Vergleich zu REST und GraphQL auf die Latenz, Effizienz und Ressourcennutzung in der Frontend-Backend-Kommunikation aus?
- Unter welchen Bedingungen ist der Einsatz von gRPC für die Frontend-Backend-Kommunikation sinnvoller als REST oder GraphQL?

Diese Forschungsfragen bilden die Grundlage für die theoretische Analyse sowie die praktische Untersuchung der genannten API-Technologien. Ziel ist es, anhand dieser Fragen sowohl die Stärken, als auch die Schwächen von gRPC-Web in Webumgebungen zu identifizieren.

1.3 Hypothese

Für eine strukturiertere Herangehensweise, werden folgende Hypothese formuliert, die die erwarteten Ergebnisse darstellen:

- Es wird angenommen, dass die Nutzung von gRPC im Vergleich zu REST und GraphQL die Latenz reduziert und die Effizienz erhöht, insbesondere bei Echtzeitanwendungen mit hohen Datenmengen. Vorallem durch das Verwenden von Protocol Buffers, ein binäres Serialisierungsformat welches auch bei gRPC-Web verwendet wird, ist eine Effizienz im Gegensatz zum klassischen JSON Format zu erwarten, wodurch sich auch beim Datenaustausch bei praktischen Messungen eine geringere Latenz zeigen sollte.
- Für gRPC-Web wird angenommen, dass sich zwar performancetechnische Vorteile ergeben werden, sich die Implementierung in Projekten der Frontendentwicklung jedoch als komplexer gestalten wird. Das Konzept von Protocol Buffers und gRPC ist komplexer als REST/GraphQL und durch den nicht so häufigen

Gebrauch in Frontend Anwendungen, gibt es weniger Dokumentation und Diskussionen in Onlineforen. Außerdem wird angenommen, dass eine Vielzahl der Entwickler bereits Vorerfahrungen mit REST bzw. Kenntnisse zu http Methoden gesammelt haben.

1.4 Methodik

Folgende methodische herangehensweise wird für die Beantwortung der Forschungsfragen angewendet:

Theoretische Analyse:

- Systematische Literaturrecherche der theoretischen Grundlagen
- Ermittlung des aktuellen Stand der Technik auf Basis wissenschaftlicher Publikationen und relevanter Industriestandards
- Vergleich sowie Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der betrachteten API-Technologien unter Berücksichtigung der identifizierten Grundlagen und wissenschaftlichen Erkenntnisse.

Erstellen eines Prototyps:

- Experimentelle Methodik: Im praktischen Abschnitt der Arbeit wird ein Prototyp entwickelt, der die ausgewählten API-Technologien implementiert.
- Auf Basis dieses Prototyps werden Performance Messungen durchgeführt, wodurch es möglich ist die Technologien auch anhand eines praktischen Beispiels gegenüber zu stellen und zu vergleichen.

Basierend auf den theoretisch und praktischen Ermittelten Daten, werden anschließend die Forschungsfragen beantwortet.

Theoretische Grundlagen

2.1 Frontend und Backend

Die Arbeit untersucht die Kommunikation zwischen Frontend zu Backend Komponenten, im industriellen als auch wissenschaftlichem Kontext sind diese Begriffe wie folgt definiert:

“Das Frontend ist das, was Ihre Benutzer sehen, und enthält visuelle Elemente wie Schaltflächen, Kontrollkästchen, Grafiken und Textnachrichten. Es ermöglicht den Benutzern, mit Ihrer Anwendung zu interagieren. Das Backend sind die Daten und die Infrastruktur, die dafür sorgen, dass Ihre Anwendung funktioniert. Es speichert und verarbeitet Anwendungsdaten für Ihre Benutzer.”

[Amazon Web Services, Inc., 2024]

Wie aus dieser Definition ersichtlich beinhaltet das Front-End den benutzerspezifischen Teil und das Backend den Datenverarbeitungsteil. Im Zuge der Bachelorarbeit werden anschließend für die Front-End-Komponente ebenso das Wort „Client“ und für die Backend-Komponente das Wort „Server“ verwendet.

2.2 Serialisierungsformate

Bei der Übertragung zwischen der Front-End und Back-End-Komponente werden Daten ausgetauscht. Da es eine Vielzahl an Technologien gibt, mit denen die jeweiligen Komponenten realisiert werden können, wurden Standards definiert, damit diese sinnvoll und effizient verarbeitet werden können.

2.2.1 JSON

JSON steht für JavaScript Object Notation und ist ein weit verbreitetes, textbasiertes Datenformat, das vor allem wegen einfacher Lesbarkeit und breiter Unterstützung in vielen Programmiersprachen Verwendung findet. Das Format basiert auf einer Schlüssel-Wert Paar Struktur mit einfacher Syntax (Klammern, Spalten, Doppelpunkte, Kommas) und kann folgende Datentypen annehmen:

- String (Zeichenkette)
- Number (Zahl)
- Boolean (true/false)
- Array (Liste)
- Object (Objekt mit weiteren Schlüssel-Wert-Paaren)
- null (leerer Wert)

JSON ist der Standard für REST und GraphQL Schnittstellen.

2.2.2 Protocol Buffers

Protocol Buffer sind ein von Google entwickeltes Serialisierungsformat. Es handelt sich hierbei um ein binäres Serialisierungsformat, das entwickelt wurde um möglichst effizient, mit hoher Performance und mit so wenig Overhead wie möglich (ohne Whitespaces oder Satzzeichen wie bei JSON) Daten zu übertragen und zu verarbeiten. Protocol Buffer sind Plattform unabhängig und mit den meisten gängigen Programmiersprachen kompatibel.

Ein zentraler Bestandteil Protocol Buffer sind dabei plattformunabhängigen .proto Files, die für die Erzeugung definiert werden müssen.

Mit den definierten .proto Files können anschließend mit einem Plattform Abhängigen Protobuf-Compiler-Tool (z.B. protoc) Datenobjekte der jeweiligen Programmiersprache generiert werden.

Aufbau der .proto Files

Hauptbestandteil der .proto Files sind messages und services.

```
message Person {  
    string name = 1;  
    int32 id = 2;  
    string email = 3;  
}
```

Messages geben dabei die Struktur der zu übertragenden Nachricht und den jeweiligen Datentypen an und einer Nummer, die beschreibt an welcher Stelle sich das jeweilige Attribut befindet, an. Die Nummerierung der Felder ist wichtig für die Serialisierung. In Protocol Buffers können unter anderem die gängigsten Datentypen wie int32, int64, float, double, bool sowie string und bytes verwendet werden.

```
service PersonService {  
    rpc GetPerson (PersonRequest) returns (Person);  
}
```

Services geben an, welche Dienste vom Server bereit gestellt werden und welche Datentypen als Parameter bei Aufruf übermittelt und als Rückgabe zurückgegeben werden. Services müssen auf der Seite des zur Verfügung stellenden Dienstes ausimplementiert werden.

Das Protobuf Serialisierungsformat wurde vorallem für die inter-server Kommunikation (innerhalb der Backend seitigen Kommunikation) entwickelt, im Zuge der Bachelorararbeit wird diese auf die Verwendung in der Frontend zu Backend Kommunikation untersucht.

2.2.3 Übertragung binärer Daten (Blob)

: Für das Übertragen von großen binären Objekten (wie Bilder, Video, Audiodateien, Dokumente, ..) wird eine große Menge an binären Daten (Datentyp: byte) gesendet. Solche großen binären Dateien, die bei der Kommunikation zwischen Client und Server gesendet werden, werden in der Webentwicklung, und vorallem im Frontend wo diese Mediendaten verarbeitet werden sollen, oft als Blob (Binary Large Object) bezeichnet.

2.3 Transportprotokolle

Die eigentlichen Daten, die in Form von Serialisierungsformaten zwischen Frontend und Backend ausgetauscht werden, werden mithilfe von Transportprotokollen von dem Client und dem Server, und umgekehrt, übermittelt. Das Hypertext Transfer Protocol (http) ist dabei für moderne Webanwendungen das zentrale und verbreitetste Transportprotokoll. Im Kontext der Bachelorarbeit, wird insbesondere auf zwei Versionen von http eingegangen:

2.3.1 HTTP/1.1

http/1 ist der momentan am weitesten verbreitetste Protokoll für die Kommunikation zwischen Frontend und Backend anwendungen. Es wird von allen Webbrowsern ohne einschränkungen unterstützt und bildet die Grundlage für die API Technologien REST und GraphQL. Das Protokoll funktioniert mittels eines request-responses Prinzips und überträgt die Daten über eine textbasierte Verbindung mittels eines TCP Transportprotokolls.

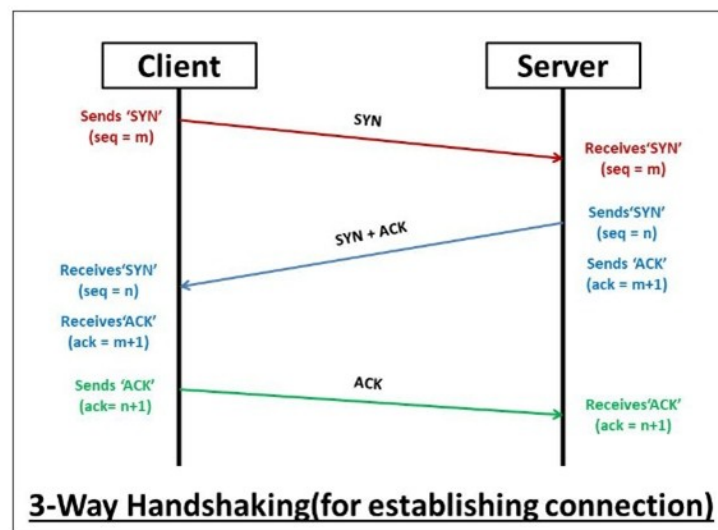


Abbildung 2.1: 3-Way Handshake (for establishing TCP connection)

Der Verbindungsaufbau erfolgt dabei mittels eines Transmission Control Protocol (TCP) – Handshakes, welcher für eine zuverlässige Verbindung zwischen zwei Systemen verwendet wird. Dabei werden in drei Schritten Steuerpakete ausgetauscht:

1. Zuerst sendet der Client ein SYN (Synchronize) – Paket an den Server
2. Der Server antwortet mit einem SYN – ACK (Acknowledge) Paket

3. Der Client antwortet mit einem ACK

Erst nach diesen Schritten, gilt die Verbindung als aufgebaut und die Daten werden übertragen.

Vor allem wegen der sequentiellen Abarbeitung und die Notwendigkeit von mehreren Verbindungen bei parallelen Requests führt häufig zu Performance Einschränkungen, welche vor allem bei datenintensiven Anwendungen zu Problemen führen kann.

2.3.2 HTTP/2

Aufgrund der bei http/1 genannten Performance Problemen wurde eine neue Version namens http/2 entwickelt, welche viele Schwächen von http/1.1, insbesondere bezogen auf Latenz und Effizienz, ausgleicht. Das Hauptmerkmal von http/2 ist Multiplexing, hierbei ist es möglich mehrere parallele Anfragen und Antworten über nur eine einzige TCP-Verbindung durchzuführen. Weitere Verbesserungen beinhalten zum Beispiel die Komprimierung von Header-Informationen oder das Server Push-Verfahren, das eine proaktive Übertragung vom Server an den Client erlaubt. Aufgrund der oben genannten Verbesserungen wird http/2 besonders in modernen Anwendungen in denen eine schnelle und effiziente Datenübertragung wichtig ist, wie beispielsweise bei gRPC, Echtzeitkommunikation oder Microservices verwendet. Webbrowser unterstützen nur eine eingeschränkte Nutzung von http/2 deshalb können bei der Kommunikation zwischen Webbrowsern und Serveranwendungen nicht alle Vorteile ausgenutzt werden. Zwar unterstützen aktuelle Webbrowser mittlerweile http/2, jedoch ist bei der Verwendung eine verschlüsselte Übertragung verpflichtend, und wichtige Features wie echtes bidirektionales Streaming (gleichzeitiges Senden und Empfangen von Daten durch Client und Server) oder http/2 Trailers (das Übermitteln zusätzlicher Metadaten am Ende einer Übertragung, z.B. zur Fehlerbehandlung, welche bei gRPC zum Einsatz kommen, werden in Webbrowsern nicht bzw. nur teilweise unterstützt. Dadurch können bei der Kommunikation zwischen Frontend (Webbrowser) und Backend nicht alle Potenziale von HTTP/2 ausgeschöpft werden.

2.4 API-Technologien

Eine API ist eine Schnittstelle eines Softwaremoduls, welche es ermöglicht, dass das jeweilige Softwaresystem mit einem anderem System kommunizieren kann. Eine Web API sind APIs die von Web-Servern zur Verfügung gestellt werden. Bei Webservern findet die Kommunikation mit einem der http bzw. https Protokollen statt. Da sich die Forschungsfragen und der Prototyp gezielt auf die Kommunikation zwischen einem

Web Frontend und einem Webserver beziehen, bezieht sich der Begriff API im folgenden immer auf Web APIs.

API Technologien wie REST, GraphQL oder gRPC legen Standards fest (Konventionen, Art der Serialisierungsobjekte, Art des Transportprotokolls) die neben der technischen Kompatibilität für die Kommunikation auch Entwicklern hilft, sich effizient in API-Systemen zurecht zu finden.

2.4.1 Representational State Transfer (REST)

Der REST-Architekturstuk wurde im Jahr 1994 von Roy Fielding im Rahmen seiner Dissertation entwickelt, mit dem Ziel eine bis dato einfache Alternative für die Kommunikation zwischen zwei Systemen zu schaffen.

Infrastruktur: Eine API-Schnittstelle ist nach Definition nur dann im REST Stil umgesetzt, falls folgende 5 Eigenschaften erfüllt werden:

- **Client-Server:** Das System muss sich in einer Server-Client Architektur umgesetzt werden. Besteht aus einem Server, der einen Dienst oder Daten bereitstellt und einem Client, welcher diese Dienste nutzen kann. Server und Client kommunizieren mittels Nachrichten, indem mittels eines Request-Respond Prinzips der Client eine Anfrage (Request) schickt und der Server eine Antwort (Respond) zurückliefert.
- **Zustandslosigkeit:** In jeder Nachricht, die zwischen Server-Client verschickt werden müssen alle Informationen enthalten sein, damit der jeweilige Kommunikationspartner die Nachricht verarbeiten kann. Es ist nicht erlaubt Zustandsinformationen zwischen zwei Nachrichten zu speichern.
- **Caching:** HTTP Caching soll benutzt werden, hierbei werden Daten in einem Cache gespeichert und bei nochmaligem abfragen vom Cache abgefragt, um unnötige Serveranfragen und Datenübertragungen zu vermeiden.
- **Einheitliche Schnittstelle:** Eine einheitliche Schnittstelle ist wie folgt definiert:
 1. **Addressierbarkeit von Ressourcen:** Jede Ressource im System ist eindeutig über eine URI adressierbar.
 2. **Repräsentationen zur Veränderung von Ressourcen:** Ressourcen können durch verschiedene Formate (wie JSON oder XML) repräsentiert und über Standard-HTTP-Methoden verändert werden.
 3. **Selbstbeschreibende Nachrichten:** Jede Nachricht enthält alle notwendi-

gen Informationen, damit der Empfänger sie interpretieren und verarbeiten kann.

4. **„Hypermedia as the Engine of Application State“ (HATEOAS):** Bei HATEOAS stellt der Server dem Client Links zur Verfügung, mittels dem der Client auf weitere Ressourcen zugreifen kann.

- **Mehrschichtige Systeme:** Systeme sollen mehrschichtig aufgebaut sein, die Kommunikationspartner müssen aber jeweils immer nur die oberste Schicht kennen.
- **Code on Demand (optional):** Im Bedarfsfall kann der Server dem Client Code zur Verfügung stellen. Diese Eigenschaft ist für einen REST Architekturstil jedoch nur optional.

Viele Web Dienste, erfüllen bereits viele dieser Eigenschaften wodurch sich REST zu einem beliebten Standard entwickelt hat.

Kommunikation zwischen Client – Server: Die Kommunikation zwischen dem findet bei REST fast ausschließlich über http/HTTPs statt, wobei laut Definition kein spezifisches Transportprotokoll vorgeschrieben wird. Im Zuge der Arbeit und der weiten Verbreitung wird im Zuge der Arbeit ausschließlich http verwendet.

HTTP stellt für den Zugriff auf Ressourcen eine Reihe an Methoden zur Verfügung. Die wichtigsten http Methoden sind :

HTTP Methode	Beschreibung
GET	GET fordert eine Ressource vom Server an. Der Zustand des Dienstes bzw. der Ressource wird dabei nicht verändert.
POST	Fügt in den meisten Fällen eine neue Ressource ein. Kann aber auch verwendet werden, um Methoden zu realisieren, die durch keine andere HTTP-Methode abgedeckt werden. Ändert den Zustand des Servers.
UPDATE	Ändert den Zustand einer bestehenden Ressource.
DELETE	Löscht eine bestehende Ressource.

Der Zugriff auf die Ressourcen erfolgt bei REST jeweils über die URL.

2.4.2 GraphQL

GraphQL ist eine open source Datenabfrage- und Manipulationssprache und wurde im Jahr 2015 von Facebook veröffentlicht. Der Standard wurde entwickelt, um eine bessere Alternative für REST Architekturen und SQL bereitzustellen, da bei REST Anwendungen eine vordefinierte Satz von Daten an den Client zurückgeliefert wird. Vor allem bei mobilen Anwendungen führte diese Einschränkung zu Problemen, da oft zu viele bzw. zu wenig Daten übermittelt wurden, was zu einem unnötigen Übertragungsvolumen führte. GraphQL erlaubt es dem Client gezielt die benötigten Daten abzufragen. Außerdem können Daten, welche in mehreren Datenobjekten verschachtelt sind, effizient abgebildet werden. Diese Eigenschaften machen GraphQL im Kontext der Datenabfrage besonders effizient und flexibel, da somit keine unnötige Datenübertragung stattfindet.

Unterstützte Operationen

Queries (schreibend):

Queries definieren die exakten Daten die vom Client angefordert werden. Die Daten werden in der selben Struktur an den Client zurückgesendet.

Mutations (manipulierend):

Mit Mutations können Daten manipuliert werden, ähnlich wie POST, UPDATE oder DELETE Funktionen bei REST. Mutations beinhalten Variablen welche vom GraphQL Server verarbeitet werden und die Struktur, welche die Struktur für den Response definiert.

Subscriptions:

Erlauben Live Updates von dem Server an den Client. Die Struktur gibt die Struktur der Nachrichten an welche an den Client übermittelt werden.

Technische Umsetzung

Technische werden GraphQL Requests und responses in einem JSON Format übertragen und die Kommunikation findet über das http Protokoll statt. Außerdem ist es Konvention, dass typischerweise alle Operationen (Queries, Mutations, Subscriptions) über einen einzigen Endpunkt (/graphql) laufen. Die Anfrage wird dabei als String im sogenannten „GraphQL Query Language“-Format an den Server geschickt. Die Antwort enthält die angeforderten Daten innerhalb eines „data“ Feldes und im Fehlerfall ein „error Feld“ in dem die jeweiligen Fehler und Details angeführt werden.

2.4.3 Google Remote Procedure Calls (gRPC)

gRPC ist ein im Jahr 2015 veröffentlichtes open-source Framework mit dem Remote Procedure Calls (RPC) durchgeführt werden können. Die Grundidee von gRPC geht darauf zurück, dass Google eine modernes und performante Technologie entwickeln wollte, das auf einem bereits intern eingesetztem RPC Framework names Stubby basiert. Stubby wurde ursprünglich innerhalb von Google entwickelt und eingesetzt, um die Kommunikation zwischen einer Vielzahl an Microservices in unterschiedlichen verteilten Systemen effizient umzusetzen. gRPC knüpft an dieser Technologie an und wurde, als Open-Source Nachfolger von Stubby veröffentlicht, um eine performante und sprachübergreifende Lösung für die Interprozesskommunikation bereitzustellen.

Remote Procedure Call: RPC beschreibt ein Kommunikationsmodell, bei dem ein Programm auf einem anderen Computer (meist Server) eine Methode auf einem anderen entfernten System aufruft, als wäre sie lokal vorhanden. Im Unterschied zu REST oder GraphQL sind RPC Calls Methoden (Methodenname, Parameter und Rückgabewert) und nicht Ressourcen orientiert, wodurch die Schnittstelle stärker an der Logik der Anwendung angelehnt ist.

Hauptanwendung findet gRPC in der Kommunikation von Micro Service Architekturen und in der inter-backend-Kommunikation. Micro Services sind kleine, eigenständigen Dienste, die jeweils eine klar abgegrenzte Aufgabe erfüllen und unabhängig voneinander entwickelt werden, jedoch (häufig in hoher Frequenz und mit großen Datenmengen) miteinander kommunizieren. Hier ist es wichtig, dass die Daten performant zwischen den verschiedenen Services hin und her geschickt werden. gRPC kann jedoch auch für die Kommunikation zwischen Browsern bzw. Mobilgeräten und Backend Services genutzt werden.

Die Kommunikation von gRPC findet standardmäßig über http/2 Protokoll statt, wodurch die in http/2 eingeführten Features die zu besserer performance und effizienz führen genutzt werden können. Außerdem wird für die Serialisierung das in 1.1.1 beschriebene Protobuff Format verwendet, welches durch die binäre Struktur zu einer weiteren Verbesserung der Performance und Effizienz führt.

2.4.4 gRPC Web

Obwohl gRPC ursprünglich für die interprozesskommunikation in Micro Services entwickelt wurde, ist es auch möglich gRPC mit Einschränkungen für die Kommunikation zwischen Web-Browsern und Backend Services zu verwenden. Da in Web Browsern nicht alle Funktionen von http/2 zur Verfügung stehen kann für die Kommunikation in

diesem Szenario nicht gRPC direkt verwendet werden. Für diesen Anwendungsfall wurde ein eigenes Protokoll namens gRPC-Web konzipiert.

Folgende Funktionen von gRPC stehen dadurch nicht zu Verfügung: bidirektionales streaming (Full Duplex Streaming), Volle Kontrolle über HTTP/2-Funktionen (z.B. Header-Komprimierung, Multiplexing, Flow-Control), gRPC-Reflection. Folgende Eigenschaften bleiben bei der Verwendung des gRPC-Web Protokolls erhalten: Protobuf als effizientes Datenformat, Codegenerierung für Server und Client, Typensicherheit, Contract-first Api mit .proto Dateien, Server-Side Streaming

Oft wird gRPC-Web über einen Proxy (z.B Envoy oder gRPC-Web-Proxy) an einen regulären gRPC-Server weitergeleitet. Dies muss gemacht werden, da gRPC-Web zwar http/1.1 oder eingeschränktes http/2 (wie es im Browser verfügbar ist) verwendet, der eigentliche gRPC Server jedoch auf vollem http/2 basiert. Ein solcher Proxy übernimmt die „Übersetzung“ zwischen gRPC-Web und gRPC (Backend). Für diese Übersetzung gibt es verschiedene gängige Varianten:

1. **Envoy Proxy:** Envoy ist ein moderner Proxy, der nativ gRPC-Web unterstützt. Er führt die „Übersetzung“ durch und leitet sie intern an den gRPC-Server weiter. → Vorteil: Skalierbar, performant → Nachteil: Zusätzlicher Deployment-Aufwand (eigene Proxy-Instanz)
2. **gRPC-Web-Proxy :** Ein Node.js-basierter Proxy, der ebenfalls als Brücke zwischen Browser und gRPC-Backend dient. → Vorteil: Schnell einzurichten → Nachteil: Weniger leistungsfähig als Envoy
3. **Direkte Serverintegration in ASP.NET Core** → Vorteil: Einfaches Setup, kein Proxy nötig, ideal für .NET-Umgebungen → Nachteil: weniger flexibel für komplexe Architekturen

Im Rahmen des implementierten Prototyps für diese Arbeit wurde die direkte Serverintegration in ASP.NET Core gewählt.

Da es in der Arbeit um die Kommunikation zwischen Web Browsern und Backend Services geht, wird in folgendem nur vor allem ein Fokus auf das gRPC Web Protokoll gelegt.

2.5 Begriffe

Latenz

Der Begriff Latenz bezieht sich im Rahmen der Bachelorarbeit auf die Zeit für die Übermittlung der Daten von dem Server an den Client, ab dem Senden des Requests von dem Client.

Durchschnitt und Median

Zur Auswertung von Messergebnissen wurden zwei Lageparameter verwendet: der Durchschnitt (arithmetische Mittel) und der Median.

Der Durchschnitt ergibt sich aus der Summe aller gemessenen Werten, dividiert durch die Anzahl der Messungen:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Der Median bezeichnet jenen Wert, er in einer sortierten Messreihe genau in der Mitte liegt. Er teilt die Messwerte in zwei gleich große Hälften und ist dadurch robuster gegenüber Ausreißern.

Stand der Technik

Moderne Webanwendungen verwenden je nach Anforderungen eine Vielzahl an verschiedenen Technologien und Frameworks. Um zu ermitteln inwiefern sich die Implementierungen von REST, GraphQL und gRPC-Web nach aktuellem Stand unterscheiden, und in welchen Szenario welche API-Technologie bevorzugt eingesetzt wird, werden aktuelle Statistiken wissenschaftliche Arbeiten zu dem Thema analysiert.

3.1 Industrielle Standards

3.1.1 Verbreitung der API-Technologien:

Sowohl REST, GraphQL, als auch gRPC sind momentan weit verbreitet API-Architekturen, wobei der Verbreitungsgrad zwischen den Architekturen stark variiert. Bezogen auf den „State of the APIs Report“ Bericht der populärsten API-Technologien von Postman aus den Jahren 2022 und 2023, deren Ergebnisse auf einer weltweiten Umfrage unter 40.261 Entwicklern und API-Professional sowie aggregierten Daten der Postman-Plattform basieren, ergeben sich folgende Ergebnisse:

- REST ist mit Abstand die populärste API. Während die Verwendung in den letzten Jahren aufgrund von neuen Architekturen langsam Abnahm, gaben 86% der Befragten an REST zu benutzen. In den Jahren zuvor waren dies 89% (2022) und 92% (2021).
- GraphQL ist nach Webhooks momentan die Drittbetiebteste API-Architektur, 29% der Befragten benutzten GraphQL. Der Trend zeigt jedoch, dass die Technologie in den letzten Jahren an Beliebtheit dazugewann. In den Jahren zuvor nutzten 28% (2022) bzw. 24% (2021) GraphQL.

- gRPC ist in dem Report auf Platz 6, 11% der Befragten benutzten die API-Technologie. Damit stagnierte gRPC im Vergleich zum Vorjahr indem ebenfalls 11% (2022) der befragten gRPC nutzten, im Jahr 2021 waren es noch 8%. Hier ist anzumerken, dass es nicht ersichtlich ist, wie viele der Befragten gRPC-Web benutzten. Da der Hauptanwendungsbereich von gRPC jedoch bei Anwendungen mit MicroService Architekturen liegt, ist anzunehmen, dass dies nur ein sehr kleiner Bruchteil ist, und gRPC-Web derzeit nicht sehr populär ist.

Entsprechend der Popularität liegen auch REST, GraphQL und gRPC dementsprechende Test, Debugging und Monitoring Tools vor. Für gRPC wurden in Eigenrecherche kaum Tools dieser Art vorgefunden. Dies könnte daran liegen, dass gRPC-Web noch relativ neu ist (JAHRESZAHL), jedoch lässt es auch vermuten, dass die Nutzung von gRPC-Web nicht sehr verbreitet ist.

3.1.2 Verbreitung von Web-Frontend Frameworks:

Neben API-Technologien beschäftigt sich die Arbeit vorallem mit der Kommunikation von Datenströmen auf der Sicht einer Web Front-End Anwendung. Laut der Stack Overflow Developer Survey 2023 gehören React, Angular und Vue.js zu den am häufigsten verwendeten Webframeworks, wobei React derzeit am weitesten verbreitet ist. Wie in der implementierung des Praktischen Teil verdeutlicht, bestehen auch zu allen analysierten API-Architekturen der Arbeit entsprechende Bibliotheken und Tools für eine Implementierung in React.

3.1.3 Einsatzbereiche der API-Architekturen der Industrie:

Um die Relevanz der Untersuchten Technologien in der gegenwärtigen Industrie zu verdeutlichen, und aufzuzeigen, für welche Einsatzbereiche sie dort verwendet werden, werden im Folgenden ausgewählte Praxisbeispiele großer internationaler Unternehmen betrachtet. Die Beispiele zeigen auf in welchen Kontexten REST, GraphQL und gRPC verwendet werden und geben Hinweise für die Einordnung in praktischen realen Anwendungen.

- REST gilt nach wie vor als Standard für öffentlichen Web-APIs und Web-Services, und wird somit flächendeckend in der Industrie verwendet. Beispiele der Einsätze sind:
 - Führende Cloud-Anbieter wie Amazon Web Servics (AWS), Microsoft Azure und die Google Cloud Platform(GCP) nutzen REST-APIs für den primären Datenzugriff für die Dienste wie Cloud-Speicherung, Datenverar-

beutung, KI-Dienste, ..

- Unternehmen oder E-Commerce-Plattformen wie eBay bieten oft umfangreiche REST-Apis an damit Entwickler Daten und Funktionen der Plattform in ihre eigenen Anwendungen integrieren können. . In dem Fall für eBay wären dies etwa ein Zugriff auf Produkt, Angebots. Oder Bestelldaten.

<https://blog.postman.com/rest-api-examples/>

- GraphQL:

- GraphQL wurde von im Jahr 2012 von Facebook entwickelt und 2015 als Open-Source-Projekt bereitgestellt. Der Hauptgrund dafür war, dass Facebook während der Entwicklung deren nativen Apps einen effizienten Austausch von Daten ermöglichen wollte um das Problem von Over- und Underfetching zu vermeiden.
- PayPal nutzt GraphQL seit 2018, Grund der Umstellung war die zuvor fragmentierte API-Landschaft zu vereinheitlichen und die Developer Experience zu verbessern. Durch den sprachunabhängigen Endpunkt wird die Entwicklung beschleunigt und die Integration für externe Händler vereinfacht.
- Netflix nutzt seit 2021 GraphQL-Microservices um Datenbanken schnell als APIs bereitzustellen, um CRUD-Anwendungen effizienter entwickeln zu können und somit die Produktivität der Teams zu erhöhen.
- GitHub stellt seit 2016 eine öffentliche GraphQL-API zur Verfügung, damit Entwickler gezielt nur die benötigten Daten in einem einzigen Aufruf Abfragen können und um die Integration mit externen Services zu vereinfachen.
- Shopify führte 2018 GraphQL für eine Admin-API ein, dabei wurde eine Admin-API um Probleme mit dem Client-Server-Datenmapping bei REST lösen. Bei der REST API waren externe Developer bei jedem API Update gezwungen deren Code anzupassen.

- gRPC:

- gRPC wurde von Google selbst entwickelt und wird dort sowohl für die interne Service-zu-Service-Kommunikation als auch in zahlreichen Google-Cloud-APIs eingesetzt.genutzt. Hauptgrund für die Entwicklung war die Notwendigkeit eines leistungsfähigen, modernen und effizienten Frame-

works für RPC Calls.

- Netflix benutzt gRPC intensiv für die interne Kommunikation zwischen seinen hunderten Microservices. Dabei wird es vor allem dafür benutzt damit Backend-zu-Backend Aufrufe so effizient wie möglich stattfinden.
- Roblox, ein populäres Videospiel mit Millionen gleichzeitig aktiven Nutzern, nutzt gRPC und Protobuf intern für die Kommunikation zwischen den Backendservices und um die Skalierbarkeit der Infrastruktur zu gewährleisten.
- Spotify nutzt seit 2019 gRPC in der Kommunikation zwischen seinen Backend-Services, um eine effizientere und performantere Infrastruktur für seine Streaming-Plattform bereitzustellen.

Die jeweiligen Beispiele zeigen klar die Haupteinsatzfelder der API-Architekturen auf. So kann abschließend gesagt werden, dass REST wegen der weiten Verbreitung und Stabilität oft für öffentliche APIs genutzt wird und sich besonders für breite Entwickler-Communities und externe Integrationen eignet. GraphQL benutzt wird wenn flexible Datenabfragen und Minimierung von Over-/Underfetching entscheidend sind, die zeigt auch das Nutzen in komplexen Frontend-Apps wie Facebook. gRPC wird hauptsächlich für interne Kommunikation mit großer Datenabfragedichte genutzt, was zeigt, dass es sich besonders für performante, hochskalierende Microservice-Architekturen und Echtzeitanwendungen eignet, in denen geringe Latenz wichtig ist.

3.2 Ähnliche Arbeiten

Neben dem industriellen Stand der Technik ist es im Zuge der Arbeit auch wichtig zu ermitteln, welche wissenschaftlichen Arbeiten es bereits bezogen auf die betrachteten Forschungsfragen gibt. Es wurden mehrere vergleichende Studien, Bachelor- und Masterarbeiten sowie wissenschaftliche Artikel zu dem Thema „Vergleich von REST, GraphQL und gRPC in Systemen mit microservice Architekturen gefunden“. Im folgenden werden einige relevante Arbeiten davon aufgezeigt. Während zahlreiche Arbeiten die Technologien im Kontext von Microservices untersuchen, fehlen vergleichende Studien aus der Perspektive von Webanwendungen, insbesondere in Bezug auf die Kommunikation zwischen Frontend und Backend.

3.2.1 Comparative review of selected Internet communication protocols

Die einzige Arbeit die gefunden wurde, die auch einen Bezug zwischen Webserver und Clients herstellt ist von Kaminski und weiteren Autoren. Die Autoren der Arbeit implementieren hierbei mehrer Webserver mit REST, gRPC, GraphQL und WebSockets in Python und passende Python-Clients um die Protokolle in verschiedenen CRUD-Szenarien zu benchmarken. Wichtig hierbei ist anzumerken, dass die Arbeit zwar von „Webclients“ spricht, es sich im Versuch jeodch nicht um Browser-basierten Frontends handelt und somit nicht gRPC-Web verwendet werden musste. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass gRPC in den meisten Tests die beste Performancewerte hatte, vorallem bei mehreren gleichzeitigen Requests. REST lag im Mittelfeld und GraphQL war im Vergleich am langsamsten.

3.2.2 Bolanowski et al. (2022): Efficiency of REST and gRPC realizing communication tasks in microservice-based ecosystems

Bolanowski et al. (2022) untersucht die Effizienz von REST und gRPC in Microservice Architekturen mit mehreren Testszenarien. Dabei werden Daten von kleineren Payloads (kurzer String oder Integer mit wenigen Bytes) über strukturierte Daten mit ein paar hundert Bytes bis hin zu Dateien mit einigen kB oder MB gesendet. Der Server wurde mit C# .NET 5 implementiert und Messungen fanden mit JMeter und IxLoad statt. Ergebnisse zeigen, dass REST bei sehr kleinen Datenmengen im Bytes Bereich schneller ist, während gRPC bei größeren Payloads (ab einigen zehn kB bis MB) deutliche Vorteile in der Performance aufweist. Die Arbeit zeigt, dass die Wahl der Technologie von der Datenmenge abhängt. Vorallem bei datenintensiven Transferen.

3.2.3 Berg & Redi (2023): Benchmarking the request throughput of conventional API calls and gRPC

Die Bachelorarbeit ... stellte einen Vergleich zwischen REST (HTTP/1.1 + JSON) und gRPC (HTTP/2 + Protobuf) an und hat dabei den Request Throughput mit einem eigenen Benchmarking-Client gemessen. Es gab vier Klassen von Payloads: XS: 73 B, S: 246 B, M: 4KB, L: 40kB. Die Tests fanden auf einem lokalen Netzwerkstatt und die Ergebnisse zeigten: Bei den Klassen XS und S erreichte REST den höheren Durchsatzm bei M und L war gRPC deutlich effizienter und skalierte besser. Begründet wurden die Ergebnisse damit, dass, ReST weniger Overhead bei winzigen Nachrichten

hat und daher bei sehr kleinen Requests im Vorteil ist, wobei die binäre Serialisierung und Multiplexing von HTTP/2 Vorteile bringt, sobald mehr Daten übertragen werden und die Anfragefrequenz höher ist. Die Erkenntnis ist daher auch, dass die Wahl der Technologie stark von der Größe der Payload abhängt und.

3.2.4 Performance evaluation of microservices communication with REST, GraphQL, and gRPC:

Niswar et al vergleichen die drei API-Protokolle REST, GraphQL und gRPC in einer Microservice-Architektur. In der Arbeit wurden 3 Services in Containern mit Redis und MySQL implementiert die Flat Data und Nested Data abrufen können. Die Performance der Protokolle wird anhand von Responsezeiten und CPU-Auslastungen bei 100 bis 500 Requests sowohl gleichzeitig als auch aufeinander abgesendet, gemessen. Die Ergebnisse zeigen auf dass gRPC die schnellste Antwortzeit und geringste CPU Last aufweist, erklärt wird dies durch http/2. Rest wies eine mittlere Leistung auf, wobei GraphQL die langsamste Antwortzeiten und höchste CPU-Belastung, besonders bei steigender Last aufwies. Das Fazit des Papers ist daher, dass gRPC am performantesten in der Microservice-Kommunikation ist, gefolgt von REST, welches sinnvoll sein kann wenn Einfachheit im Vordergrund steht. GraphQL ist am ressourcenintensivsten bietet jedoch Flexibilität.

Theoretische Analyse und Vergleich der API-Technologien:

4.1 Theoretische Analyse und Vergleich der API-Technologien:

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen, sollen anschließend die ausgewählten API-Technologien: REST, GraphQL, gRPC und gRPC-Web direkt miteinander verglichen werden. Neben der technischen Eigenschaften sollen auch Aspekte wie Verbreitung im Frontend, Erlernbarkeit und Effizienz betrachtet werden. Ergänzend soll auch der momentane Stand der Technik eingeordnet und ähnliche wissenschaftliche Arbeiten herangezogen werden. Ziel des Kapitels ist es, die jeweiligen Stärken und Schwächen der Technologien herauszuarbeiten und aufzuzeigen.

4.1.1 Vor- und Nachteile der API-Technologien

Das folgende Kapitel soll die Vor- und Nachteile der APIs aufzeigen.

4.1.1.1 REST

Vorteile:

- REST ist der etablierteste API-Standard für Web-APIs.
- Es ist im Vergleich einfach und intuitiv aufgebaut.
- Ein Großteil der Entwickler ist bereits mit dem Standard vertraut.
- Wird in den meisten Web-Clients nativ unterstützt und liefert typischerweise JSON, welches für Menschen leicht lesbar ist.

- HTTP-Funktionen wie Caching und Authentifizierung können direkt genutzt werden.
- Durch die weite Verbreitung gibt es eine Vielzahl an Tools für die Entwicklung und das Testing (z.B. Postman, Swagger).

Nachteile:

- Der größte Nachteil von REST ist das Over-Fetching bzw. Under-Fetching. Es gibt klar definierte Endpunkte die einen gewissen Datenansatz zurückliefern. Hierbei kann es zu dem Problem kommen, dass man mehr Daten übertragen muss, als man benötigt, was zu zusätzlichen Netzwerklast und höheren Latenzen führt.
- Jeder Request ist stateless, das heißt, alle Kontextinformationen müssen immer mitgeliefert werden, was bei einer Vielzahl von Requests ineffizient sein kann.
- Versionierung: Änderungen der API erfordern oft neue Endpunktversionen, was die Wartung erschweren kann.
- Auch wenn meist JSON für die Übertragung genutzt wird, gibt es an sich keine strikte Typsicherheit.

4.1.1.2 GraphQL

Vorteile:

- GraphQL bietet eine präzise Datenabfrage, der Client bekommt genau die Menge an Daten, die benötigt wird, Over-Fetching bzw. Under-Fetching wird verhindert.
- Mehrere Ressourcen können in einer Anfrage kombiniert werden, im Gegensatz zu REST, wo mehrere Endpunkte separat aufgerufen werden müssen. Diese Eigenschaft verringert die Netzwerkrundläufe, was vor allem bei langsamen oder mobilen Verbindungen effizient ist.
- GraphQL ist stark typisiert, alle verfügbaren Datentypen und Felder sind definiert und können vom Client abgefragt werden, was die Entwicklung erleichtert.
- Neue Felder können einfach hinzugefügt werden ohne bestehende Queries verändern zu müssen.

Nachteile:

- Die Flexibilität die durch GraphQL für das Frontend schafft, verlagert die Komplexität auf den Server.
- Die Implementierung kann ohne Batch-Loading oder Caching-Strategien zu Performance Einbußen führen, da meistens alle Abfragen über nur einen einzigen /graphql-Endpoint per POST laufen, und somit das übliche http-Caching- nicht automatisch funktioniert.
- Das fehlen des eingebauten HTTP-Caching führt dazu, dass Entwickler eigene Caching-Lösungen implementieren müssen.
- Durch die frei gestaltbaren Queries ist es außerdem schwierig, paschale Limits oder Vorhersagen über Lasten zu definieren.
- Im Gegensatz zu REST ist GraphQL nicht weniger verbreitet und es gibt eine begrenztere Anzahl an Debugging Möglichkeiten.

4.1.1.3 gRPC

Vorteile:

- gRPC ist auch Hochleistung ausgelegt. In der Web-Variante gRPC-Web können diese Vorteile zum Teil auch im Browser genutzt werden.
- Durch das Verwenden von Protocol Buffers, sind die gesendeten Nachrichten binär kodiert, äußerst kompakt und dadurch schneller übertragen als z.B. JSON.
- . In Kombination mit http/2.0 als Transport ermöglicht dies eine sehr niedrige Latenz und effiziente Ausnutzung der Verbindung (Multiplexing).
- gRPC ist streng typisiert, und die zu sendenden Datenstrukturen als auch zur Verfügung stehenden Dienste sind in einer .proto Definition klar definiert.
- . Dieser klare Vertrag zwischen Client und Server erhöht die Typsicherheit, reduziert messstände und Fehler zur Laufzeit.
- Außerdem unterstützt gRPC Streaming in beide Richtungen.

Nachteile:

- Da gRPC auf http/2 basiert und davon spezielle Features nutzt, die von vielen Webbrowsern nicht unterstützt werden, ist es ohne Weiteres nicht in Browser Umgebungen nutzbar.

- Die Lösung hierfür ist die Übersetzung von gRPC zu gRPC-Web, welches im Browser benutzt werden kann. Diese Notwendige Zwischenschicht erhöht jedoch die Infrastruktur-Komplexität und kann zu Fehlerquellen führen.
- Einige Features, die zu einer Latenzreduzierung führen, gehen dadurch verloren.
- gRPC wird nicht so häufig für die Kommunikation zwischen Web und Backend benutzt, dadurch gibt es weniger Debugging-Tools.
- Die Nutzung von gRPC ist nicht so intuitiv und einfach wie REST und erfordert eine Einarbeitung in neue Tools und Konzepte.
- Gerade im Frontend-zu-Backend-Kontext muss abgewogen werden, ob der Performancegewinn die erhöhte Komplexität rechtfertigt.

4.1.2 Effizienzvergleich: Latenz, Datenvolumen und Ressourcenverbrauch

Latenz und Antwortzeit: Latenz und Antwortzeit: Durch das binäre Protokoll und http/2.0-Multiplexing sind gRPC-Aufrufe in der Regel sehr schnell in der Übertragung und haben somit die geringste Latenz. Auch in empirischen Daten wird aufgezeigt, dass gRPC die geringsten Antwortzeiten hat, gefolgt von REST. GraphQL hat dabei tendenziell die langsamsten antworten. In der Studie wurde dabei in einer Microservice-Umgebung 100-500 Datenrequests abgerufen und die Zresponse-Zeiten ermittelt. Festzuhalten ist dabei, dass es sich in der Studie um gRPC und nicht um gRPC Web handelte. Während die Antwortzeit bei GraphQL am langsamsen war, konnten hier jedoch für Anfragen mit vielen verknüpften Daten die Anzahl der benötigten http-Requests reduziert werden. Sobei war teilweise in Summe GraphQL schneller, da diese Anfrage schneller abgeschlossen war als die Summe an mehreren REST-Aufrufen. Im Gegensatz dazu, kann REST jedoch bei wiederholten Aufrufen von http-Caching profitieren.

Datenvolumen: Für die Übertragung von sehr kleinen Payloads (z.B. Text, JSON) hat gRPC durch die http/2, binäre Protobuf-Serialisierung und Header-Kompression die geringste Latenz und den niedrigsten Overhead. REST und GraphQL haben bei einfachen Einzel-Abfragen eine vergleichbare Latenzm wobei GraphQL den Vorteil hat, dass mehrere kleine Abfragen gut kombiniert werden können, wodurch Over-Fetching verhindert wird. Auch bei großen Datenmengen (z.B. Bilder, Videos) ist gRPC durch die native Streaming Unterstützung und das binäre Framing effizienter als die anderen Technologien. REST kann große Dateien als Blob senden, dies ist aber weniger performant. GraphQL ist beim senden großer binärer Daten am wenigsten geeignet, da diese

meist zuerst in base64 kodiert werden müssen, wodurch sich der Overhead um ca. 33 % erhöht.

CPU- und Ressourcenverbrauch: Neben dem Senden der Nachricht über das Netzwerk müssen die Nachrichten nach dem erhaltenen Responses auch weiterverarbeitet werden, damit das jeweilige System mit den Daten arbeiten kann. Das Serialisieren / Deserialisieren von Nachrichten ist bei gRPC sehr effizient. Das Parsen der binären Protobuf Daten nimmt im Vergleich zu der Verarbeitung von JSON-Strings bei REST / GraphQL sehr wenig CPU-Zeit in Anspruch. Dies spart sowohl Server- als auch Clientseitige Zeit ein. Da die bei GraphQL flexibel Queries erst ausgewertet und zusammengestellt werden müssen, ergibt sich bei dieser Technologie eine weitere Komponente, die CPU-intensiv sein könnte. Auch aktuelle Untersuchungen zeigen, dass GraphQL-Server bei intensiven Abfragen eine höhere CPU-Auslastung als REST oder gRPC Server haben. Die Auslastung hängt jedoch stark von der Implementierung ab, so gab es andere Studien mit anderen Testbedingungen, deren Ergebnis zeigte, dass GraphQL bis zu 37% weniger CPU und 40% weniger Speicherverbrauch im Vergleich zu REST hatte. Dies kann erklärt werden, da GraphQL weniger Daten sendet und somit die clientseitige Nachverarbeitung reduziert, während REST durch caching Strategien in manchen Fällen schneller antwortet.

4.1.3 Erlernbarkeit

4.1.3.1 REST

Abgesehen von der weiten Verbreitung von REST, gilt diese Technologie auch als einfach erlernbar und schnell einsetzbar. Durch die Nutzung von Standard-http und einfachen CRUD-Methoden (GET, POST, etc.) wird eine flache Lernkurve aufgewiesen. Es gibt zahlreiche Tools und Beispiele, was den Einstieg zusätzlich erleichtert.

4.1.3.2 GraphQL

GraphQL bringt aufgrund neuer Konzepte wie, Schemas, Queries, der eigenen Abfragesprache und der Resolver-Logik eine steilere Lernkurve als Rest auf. Auch Umfragen bei Entwicklern zeigen auf, dass GraphQL initial komplexer zu implementieren war als REST. Generell ist GraphQL auch weniger verbreitet als REST wodurch Anfänger auf weniger Ressourcen zurückgreifen können.

4.1.3.3 gRPC

Auch gRPC hat im Vergleich zu REST einen erhöhten Einarbeitungsaufwand, da für die Verwendung die Konzepte von Protocol Buffers, Streaming-Kommunikation und dem Kompilieren von .proto-Dateien vertraut sein müssen. Außerdem braucht man eine spezifische Toolchain wie protoc und passende Codegeneratoren für die jeweilige Sprache. Entwicklerumfragen zeigen auf, dass gRPC im Vergleich zu REST deutlich seltener eingesetzt wird und aufzeigt, dass Tools, Beispiele und Community-Ressourcen weniger verarbeitet sind als bei REST.

Auch Entwicklerumfragen zeigen auf, dass REST die am einfachste zu erlernende Technologie ist.

Entwicklung und Umsetzung des Prototyps

Um die Unterschiede bezogen auf Latenz und Performance von REST, GraphQL, gRPC und gRPC-Web in einem konkreten Anwendungsfall zu ermitteln, wurde ein Prototyp entwickelt, mithilfe dessen Messungen zwischen einer Frontend- und Backendanwendung durchgeführt werden können. Bei den Messungen wurde die Zeit des Datenaustauschs zwischen den zwei Kommunikationspartnern (End-to-End Latenz) erfasst und anschließend verglichen und analysiert. Die so gewonnenen Daten sollen anschließend die Basis dafür bilden, um die zuvor theoretisch untersuchten Eigenschaften der Technologien unter realen Bedingungen zu überprüfen.

Zielsetzung

Ziel des praktischen Teils ist es die Leistungsfähigkeit von den genannten API-Technologien zu untersuchen und gegenüberzustellen. Der Prototyp soll so implementiert werden, sodass für jede Technologie eine vergleichbare Umgebung mit den ähnlichen Bedingungen entsteht. Im Fokus der Messungen steht die End-To-End Latenz, also jene Zeitspanne vom Absenden einer Anfrage bis zur vollständigen Verarbeitung und Bereitstellung der Antwort im Client.

Ziel der Messungen ist es Unterschiede zwischen den Technologien sichtbar zu machen und mit den im Theorieteil ermittelten Daten zu vergleichen. Auf dieser Grundlage und mit Rücksichtnahme auf den Recherche teil, werden anschließend Rückschlüsse auf die Eignung der einzelnen Technologie für die Kommunikation zwischen Frontend- und Backend-Anwendungen gezogen.

5.1 Versuchsaufbau

Der entwickelte Prototyp besteht grundsätzlich aus 3 verschiedenen Komponenten: Ein Backend-Service, ein Web-Client und ein Microservice ähnlicher Konsolen-Client.

Abbildung X [TO-DO] zeigt den schematischen Aufbau des Versuches.

Die zwei verschiedenen Client-Typen können hierbei mit dem gemeinsamen Backend-System kommunizieren.

Der Schwerpunkt der Messungen liegt in folgenden Bereichen:

- Vergleich einzelner und mehrfacher Requests
- Einfluss verschiedener Browser
- Unterschiede zwischen Microservice-Client und Browser-Client

Systemarchitektur:

Front-End Clients:

Der Versuchsaufbau beinhaltet zwei unabhängige Clients, welche jeweils auf einer unterschiedlichen Art auf den Backend-Service zugreifen:

1. Web-Client: die Übertragung findet dabei zwischen einem Browser und dem Back-End Service statt. Der Web-Client kann auf die REST, GraphQL und gRPC-Web API zugreifen.
2. Konsolen Client: die Übertragung findet zwischen einer Micro-Service ähnlichen Konsolenanwendung und dem Back-End Service statt. Der Konsolen Client kann auf die REST, GraphQL, gRPC und gRPC-Web API zugreifen.

Backend Service:

Der Backend-Service stellt verschiedene Services zur Verfügung und kann von beiden Front-End Clients Anfragen entgegen nehmen. Die verschiedenen Services wurden so ausgewählt, sodass die gesendeten Daten möglichst realitätsnahe Anwendungsfälle der Frontend-Backend Kommunikation abdecken.

Grundsätzlich, kann auf 3 verschiedene Services zugegriffen werden:

- Text – Service: Der Text-Service stellt einen Text im Datentyp „string“ zur Verfügung. Dabei können mit den Datengrößen 1 kB, 10 kB und 100 kB abgefragt werden.

- **Media – Service:** Der Media-Service stellt Medien zur Verfügung, die mittels eines byte[] verschickt werden. Bei den Medien handelt sich um ein Bild (4 MB), einer Audio-Datei (30 MB) und einer Video Datei (100 MB).
- **Blog - Service:** Bei dem Blog Service handelt sich um einen 10 kB großen Datentypen, der verschachtelt andere Datentypen (Text - String, Zahlen - int und Datum - "DateTime") versendet.

Die in den Services verwendeten Datentypen, sind die gängigsten Datentypen in der Frontend-Backend Kommunikation.

Alle Services wurden separat mit den Technologien REST, GraphQL, gRPC und gRPC-Web implementiert und können somit von den jeweiligen Clients abgefragt und verglichen werden.

Abbildung X [TO-DO] zeigt den schematischen Aufbau der Backend-Services.

Testfälle:

Zur Analyse der Client-Server Kommunikation wurden folgende Testfälle definiert, welche relevante Aspekte der Front-End Kommunikation abdecken und für einen adäquaten Vergleich der API-Technologien herangezogen werden können:

- **Einzelabfragen - Web-Client (1 Request):** Vergleich der Technologien bei beim senden eines einzelnen Requests. Dies wird jeweils bei jedem der definierten Services und für jede vorhandene Datengröße durchgeführt. Die Abfragen werden jeweils mit REST, GraphQL und gRPC-Web durchgeführt. Die Messungen zeigen Ergebnisse über Latenz und Performance.
- **Mehrfachabfragen - Web-Client (20 Requests):** Analog zum Einzelrequest, wird der Versuch erneut mit Mehrfachabfragen durchgeführt, um zu sehen, wie gut die Technologie skalieren, Ressourcen nutzen und mehrere Requests effizient handhaben kann.
- **Unterschiede bei der Nutzung von verschiedenen Browsern):** um den Einfluss des Webbrowsers auf die Messungen des Web-Clients zu identifizieren, werden erneut Einzelrequests in verschiedenen Webbrowsern durchgeführt. Durch den Versuch wird festgestellt, ob eine Abhängigkeit des Browsers auf die Technologie besteht.
- **Einzelabfragen - Konsolen-Client (1 Request):** Analog zu den Einzelrequests des Web-Clients wird der Versuch erneut mit einem mircoservice ähnlichem

Konsolenclient durchgeführt. Hierbei wird jedoch auch abgesehen von REST, GraphQL und gRPC-Web die Latenz von gRPC gemessen. Durch den Versuch ist eine Gegenüberstellung der Response Zeiten zwischen den beiden Clients möglich.

Da es in Web Browsern nicht möglich ist raw gRPC zu verwenden, konnte diese Messung im Rahmen des Browser-Client-Versuchsaufbaus nicht durchgeführt werden. Um Messwerte zwischen gRPC und gRPC-Web zu vergleichen, und um zu sehen in wiefern sich die Performance zwischen Browser – Backend und Microservice – Backend wurde der zweiter Versuchsaufbau mittels eines Konsolen Clients durchgeführt.

Rahmenbedingungen

Um einen fairen Vergleich herzustellen, wurden alle Requests ausschließlich mit dem HTTP/2.0 Protokoll durchgeführt und verschlüsselt mit https versendet. Bei der Response-Zeit handelt es sich jeweils um die End-to-End-Latenz aus der Sicht des Nutzers. Es wird dabei die Zeit ab dem Absenden des Requestes bis zu dem Zeitpunkt, ab dem die Daten tatsächlich im Client fertig verarbeitet bereitstehen gemessen. Die Response Zeit beinhaltet also:

1. die Transportzeit über das Netzwerk: Zeit für den Hin- und Rückweg des Pakets durch das Netzwerk.
2. Back-End-Verarbeitung: Die Serverseitige Bearbeitung des Requests
3. Antwortübertragung: Zeit für das Senden der Antwort(inklusive Header und Payload) zurück an den Client.
4. Clientseitige Verarbeitung: die Verarbeitung des Responses, sodass die Daten tatsächlich im Client verwendet werden können. (JSON Parsing, Binär-Parser).

5.2 Implementierung:

Der Prototyp beinhaltet einen Backendservice, einen Web-Client und einen Konsolen Client. Dieser Abschnitt befasst sich mit der Implementierung der jeweiligen Komponenten.

Um die Vergleichbarkeit der jeweiligen API-Technologien zu erhöhen, wurden alle Clients und Services so minimalistisch wie möglich umgesetzt, da weitere Frameworks oder Logik die Datenverarbeitung beeinflussen, und somit die tatsächlichen Zeiten verzerren könnten. Jeder Service liefert ausschließlich den für den Testfall angeforderten Daten.

Ziel dieses Abschnittes ist es die Architekturentscheidungen, Funktionsweisen sowie die technischen Aspekte darzustellen, auf Basis anschließend die Messungen durchgeführt werden.

5.2.1 Backend Service:

Der Backend Service wurde modular und technisch getrennt umgesetzt, um die Technologien jeweils unabhängig voneinander vergleichen zu können. Die Implementierung basiert auf .NET 9, einer plattformunabhängigen Open-Source-Laufzeitumgebung von Microsoft, die für moderne Web- und Microservice-Anwendungen konzipiert ist. Die Services stellen für jede der APIs dieselben Daten zur Verfügung und können folgendermaßen Abgefragt werden:

- REST: per HTTP-GET auf definierte Endpunkte
- GraphQL: über einen einzigen Endpunkt, wobei der Client die benötigten Felder in der Query spezifiziert.
- gRPC und gRPC-Web: als typisierte RPC call (HTTP/2, Protobuf)

Inhalt	REST-Endpunkt	gRPC-Methode	GraphQL-Abfrage
Großer Text	GET /text/large	Text.GetLarge()	query { large { content } }
Video (MP4)	GET /media/video	Media.GetVideo()	query { video }
Blogposts	GET /api/blog	Blog.GetAll()	query { posts { title, author... } }

Abbildung 5.1: Daten

Die Struktur des Backend-Services gliedert sich in 4 eigenständige Projekte:

1. Common: Das Common Projekt stellt die Testdaten zentral zur Verfügung. Damit die Testdaten bei einem Request nicht zuerst aus der Datei gelesen werden

müssen, werden diese bei Programmstart einmal in den Arbeitsspeicher geladen. Zu diesem Zweck wurde ein API – Cache erstellt, der alle Text und Medienobjekte vorab einliest, die Daten können dann zur Laufzeit direkt vom Cache abgefragt werden.

Für die Testdaten wurden Datentypen die typischerweise an Web Clients gesendet werden ausgewählt und beinhalten:

- Texte in drei Größen: 1 kB, 10 kB, 100 kB
 - Medieninhalte: 3 MB Foto, 30 MB Audio-Datei, 100 MB Video-Datei
 - Strukturierte Binärdaten: ein selbst definierter Datentyp mit verschachtelten Abschnitten, Metadaten, Zahlenblöcken und Autoreninformationen
2. RestAPI: Die REST API wurde mittels einem Controller Muster von ASP.NET Core implementiert und stellt 3 eigenständige Endpunkte zur Verfügung. Die Kommunikation erfolgt ausschließlich über http GET.

Die Controller sind wie folgt definiert:

- **TextController:** Stellt Textdaten in drei Größen zur Verfügung.
Rückgabeformat: `application/json`
 - **MediaController:** Stellt ein Bild, eine Audiodatei und ein Video bereit.
Rückgabeformat: Binärdaten (`byte[]`) mit MIME-Type `image/jpeg`, `audio/wav`, `video/mp4`
 - **BlogController:** Stellt einen vordefinierten Blogeintrag bereit.
Rückgabeformat: `application/json`
3. GraphQLAPI: Die GraphQL-API wurde mittels des .NET-Frameworks `HotChocolate` implementiert. Als Einstiegspunkt wurde eine `Query`-Klasse definiert, welche für die verschiedenen Services (Text, Medien, Blog) mit jeweiligen Teildateien erweitert wurde.

Folgende Queries wurden definiert:

- **TextQuery:** Stellt die Felder `small`, `medium` und `large` bereit, welche jeweils Textinhalte als `string` zurückgeben.
- **MediaQuery:** Stellt die Felder `image`, `audio` und `video` bereit, welche in der GraphQL-Antwort Base64-kodiert übertragen werden.
- **BlogQuery:** Stellt das Feld `posts` zur Verfügung, welches die für den Blogpost definierten Daten enthält.

Alle Abfragen erfolgen über HTTP POST-Anfragen an den Endpunkt `/graphql` und haben das Format `application/json`.

4. **GrpcWebAPI:** Die gRPC-Web-API basiert auf den definierten `.proto`-Dateien (`text.proto`, `media.proto`, `blog.proto`). In den Proto-Dateien wurden sowohl die *Messages* und Datentypen der Testdaten als auch die *Services*, mit denen auf die Messages zugegriffen werden kann, definiert.

Die Services implementieren folgende Methoden:

- **TextService:** Rückgabe der drei Textgrößen über die Methoden `GetSmall()`, `GetMedium()` und `GetLarge()`.
Rückgabeformat: `TextResponse`-Message mit einem `string`-Feld (`content`), serialisiert im Protocol-Buffers-(binary)-Format.
- **MediaService:** Streaming von Binärdaten in 64 kB-Chunks über die Methoden `GetImage()`, `GetAudio()` und `GetVideo()`. Anders als bei den anderen Services werden hier die Mediendateien nicht als vollständige Datei, sondern als 64 kB-Chunks gestreamt. Da gRPC nicht dafür konzipiert wurde, große Dateien am Stück zu übertragen, ist dies die empfohlene Vorgehensweise für den Umgang mit großen Dateien. Bei REST und GraphQL hingegen wurde auf ein solches Streaming verzichtet, da entsprechende Mechanismen nicht nativ unterstützt werden.
Rückgabeformat: Server-Streaming von Chunk-Nachrichten (`bytes`-Feld), serialisiert als Protocol-Buffers-Stream über HTTP/2.
- **BlogService:** Rückgabe strukturierter Blogposts via `GetAll()`.
Rückgabeformat: `BlogPostsResponse` (Liste von `BlogPost`-Nachrichten), ebenfalls als Protocol Buffers (binary) kodiert.

Die API wurde so konfiguriert, dass sowohl normales gRPC als auch gRPC-Web verwendet werden kann. Die Implementierung für gRPC-Web wird mittels des Pakets `Grpc.AspNetCore.Web` bereitgestellt. Die Generierung der gRPC-eigenen Klassen erfolgte mittels *gRPC Tools*. *gRPC Tools* erstellt dabei bei jedem Build die im Proto-File definierten Klassen, die anschließend im Code verwendet werden können.

Die Tabelle X zeigt die Libraries, Frameworks und Tools, sowie deren Versionen welche für die Implementierung des Backend-Services eingesetzt wurden.

Tabelle 5.1: Verwendete Technologien

Komponente	Technologie/Tool	Version
Backend-Framework	.NET SDK	9.0
REST API	ASP.NET Core Web API	9.0.5
GraphQL	HotChocolate	15.1.5
gRPC	Grpc.AspNetCore	2.71.0
gRPC-Web	Grpc.AspNetCore.Web	2.71.0
Protobuf Tools	Grpc.Tools / protoc	2.72.0

5.2.2 Web-Client:

Um die Messungen aus der Sicht eines Front-End-Clients durchzuführen, wurde ein Web-Client erstellt. Von der Anwendung aus, können die Requests an die jeweiligen Services gesendet werden. Beim Senden eines Requests wird die End-To-End Latenz im Client gemessen und anschließend mit der Payload grafisch angezeigt.

Die Implementation wurde mit `React` und `TypeScript` durchgeführt und mithilfe von `Vite` gebündelt und lokal bereitgestellt.

Architektur und Aufbau

Der Web-Client dient primär als Simulation eines realen Benutzerverhaltens einer Front-End-Anwendung. Über ein einfaches Interface kann ausgewählt werden:

- Gegen welche API-Schnittstelle (REST, GraphQL, gRPC-Web) ein Request ausgeführt werden soll
- Welche Datenart (Text, Medien, strukturierter Blog-Inhalt) und welche Datenmenge übertragen werden soll
- Ob ein einzelner Request oder eine Mehrfachanfrage parallel durchgeführt werden soll

Sowohl bei REST als auch bei GraphQL wird im Frontend die browsernative `fetch`-API für die Kommunikation mit dem Backend verwendet. Für die Kommunikation mit der gRPC-Web-Schnittstelle werden gRPC-Bibliotheken eingesetzt. Die Generierung der gRPC-Klassen erfolgt mittels der `ts-protoc-gen`-Bibliothek mit folgendem Befehl:

```
npx protoc --ts_out src/api/generated --proto_path=src/proto sr
```

Clientseitige Datenverarbeitung

Nach erfolgreichem Empfang der Daten vom Server müssen die Daten vom Client verarbeitet werden, damit diese anschließend verwendet werden können. Abhängig vom ausgewählten API-Typ und der Datenmenge werden die Daten jeweils unterschiedlich verarbeitet.

Textdaten

- Bei REST und GraphQL erfolgt das Parsen des gesendeten JSON mittels der nativen `fetch`-API.
- Bei gRPC-Web wird die Protobuf-Nachricht automatisch über die generierten TypeScript-Klassen des `protobuf-ts`-Plugins deserialisiert.

Mediendaten Medieninhalte werden binär als `byte[]` übertragen.

- Bei REST erfolgt der Empfang direkt als Blob über `response.blob()`.
- Bei GraphQL werden die Binärdaten Base64-kodiert als String im JSON-Response übertragen und im Client manuell dekodiert.
- Bei gRPC-Web werden die Binärdaten als Daten-Chunks gestreamt. Die Chunks werden im Client rekonstruiert.

Blogdaten

- Bei REST und GraphQL werden JSON-Objekte mit verschachtelter Struktur geparkt.
- Bei gRPC-Web erfolgt die Deserialisierung über generierte Protobuf-Klassen.

Die Tabelle X zeigt die Libraries, Frameworks und Tools, sowie deren Versionen welche für die Implementierung des Web-Clients eingesetzt wurden.

5.2.3 Konsolen-Client

Um Messungen von raw gRPC durchführen zu können wurde ein Konsolen-Clients implementiert. Dadurch können Response-Zeiten zwischen gRPC und gRPC-Web direkt miteinander verglichen werden. Außerdem kann aufgezeigt werden, wie sich gRPC-Technologien, welche für Microservice-Architekturen erstellt wurde, im direkten Vergleich zur Kommunikation zu Web-Clients ver-

Tabelle 5.2: Verwendete Frontend-Technologien

Komponente	Technologie/Tool	Version
Frontend-Framework	React	19.1.0
Bundler	Vite	6.3.5
TypeScript Compiler	TypeScript	5.8.3
REST	fetch API (Browser native)	(native)
GraphQL Client	fetch API (Browser native)	(native)
gRPC-Web Transport	grpcweb-transport	2.11.0
Protobuf TS Plugin	protobuf-ts	2.11.0
Protoc Codegen Plugin	ts-protoc-gen	0.15.0
gRPC-Web Codegen	protoc-gen-grpc-web	1.5.0

halten und ob generell auch in en anderen Technologien Unterschiede aufgezeigt werden können.

Der Konsolen-Client kann alle unterstützten APIs (REST, GraphQL, gRPC und gRPC-Web) ansprechen und führt Messungen über ein textbasiertes Menüsystem durch. Es werden nur Einzel-Requests unterstützt.

Kommunikationsmechanismen

Die Kommunikation erfolgt jeweils über folgende Mechanismen:

- **REST:** per `HttpClient` mit JSON-Deserialisierung
- **GraphQL:** per `GraphQL.Client`-Bibliothek
- **gRPC:** über `Grpc.Net.Client` direkt als native gRPC-Kommunikation
- **gRPC-Web:** über `Grpc.Net.Client.Web` mittels spezieller Web-Handler, angepasst an das gRPC-Web-Protokoll

Die interne Verarbeitung wurde so implementiert, dass die Messungen der Response-Zeit analog zum Web-Client das Empfangen und anschließend das Parsen beinhalten. Bei den Mediendaten findet auf Client-Seite keine weitere Verarbeitung des `byte[]`-Arrays statt, daher ist hier eine Gegenüberstellung zum Web-Client nicht sinnvoll.

Die Tabelle X zeigt die Libraries, Frameworks und Tools, sowie deren Versionen welche für die Implementierung des Konsolen-Clients eingesetzt wurden.

Tabelle 5.3: Verwendete Technologien des Konsolen-Clients

Komponente	Technologie/Tool	Version
Client-Framework	.NET SDK	9.0
GraphQL Client	GraphQL.Client	6.1.0
GraphQL Client Serializer	GraphQL.Client.Serializer.Newtonsoft	6.1.0
gRPC Client	Grpc.Net.Client	2.71.0
gRPC-Web Client	Grpc.Net.Client.Web	2.71.0
gRPC Code Generator	Grpc.Tools	2.72.0

5.3 Spezifikationen des Testsystems

Um die Messergebnisse korrekt und vergleichbar einordnen zu können, ist es notwendig darzustellen, unter welchen technischen Rahmenbedingungen die jeweiligen Messungen durchgeführt wurden. Da die Leistungsfähigkeit der Hardware sowie die Softwareversionen die Messzeiten beeinflussen können, werden in diesem Abschnitt die relevanten Komponenten des Testsystems dargestellt.

Für die Messungen wurde folgendes Testgerät verwendet: Lenovo ThinkPad X1 Carbon der 10. Generation (Modellbezeichnung: 21CB)

Hardwarekonfiguration

- **Prozessor (CPU):** 12th Gen Intel® Core™ i5-1245U, 1600 MHz, 10 Kerne
- **Arbeitsspeicher (RAM):** 16 GB LPDDR5, 5200 MT/s
- **Massenspeicher (SSD):** 512 GB NVMe SSD

Betriebssystem: Microsoft Windows 11 Pro (Version: 10.0.26100, Build 26100)

5.4 Messung

Ziel der Messungen ist es, die End-to-End-Latenz und Performance bei der Datenübertragung zwischen Front-End und Back-End zu quantifizieren und somit die im theoretischen Teil beschriebenen Eigenschaften der verschiedenen API-Technologien mit einem praktischen Anwendungsfall zu vergleichen. Die Responsezeiten beschreiben die tatsächliche Zeit, bis die jeweiligen Daten im Client bereitstehen (Datenübertragung und Parsing). Dabei wurden unterschiedliche Datenarten verwendet, die häufig in der Frontend-zu-Backend-Kommunikation zum Einsatz kommen.

Untersucht wurde die Response-Zeit von Einzel-Requests, Mehrfachabfragen (20 parallele Requests) und browserabhängige Unterschiede in einem Web-Client. Zusätzlich wurden alle Technologien (REST, GraphQL, gRPC-Web und gRPC) im Konsolen-Client getestet, um Unterschiede zwischen browserbasierter und microservice-orientierter Kommunikation sichtbar zu machen und Unterschiede zwischen gRPC und gRPC-Web zu ermitteln.

Die Messungen wurden ausschließlich lokal auf localhost durchgeführt. Dadurch können zusätzliche Einflüsse wie Paketverlust, Routing-Latenz oder Bandbreitenschwankungen, die bei realen Bedingungen auftreten würden, ausgeschlossen werden. Ziel der Messungen war es, tatsächliche Unterschiede zwischen den API Technologien (gRPC, gRPC-Web, REST, GraphQL) unter optimalen Bedingungen und reproduzierbar zu ermitteln. Die Ergebnisse repräsentieren daher keine realen Szenarien. Der Fokus wurde ausschließlich auf den Vergleich der Kommunikationsprotokolle und deren Verarbeitung gelegt.

Die Ergebnisse der Messungen liefern eine Grundlage zur Beantwortung der Forschungsfragen, inwiefern sich die Schnittstellentechnologien hinsichtlich der Effizienz und Eignung für typische Frontend-Szenarien unterscheiden. Die nachfolgenden Abschnitte stellen die gemessenen Daten dar und geben einen direkten Vergleich der Technologien.

Messdaten: Web-Client (Einzel-Request)

Bei der Messung der End-To-End Latenz ergaben sich zwischen den einzelnen Technologien erhebliche Unterschiede. Für eine sinnvolle Auswertung der Daten, wurden jeweils 30 Requests unabhängig voneinander durchgeführt die Durchschnittszeiten und der Median der aus den gemessenen Daten ermittelt.

Tabelle 5.4: Chrome-Client – Einzel-Requests: Durchschnitt und Median (Antwortzeit in ms)

Technologie	Service	Datentyp	AVG	MEDIAN
REST	Text	small text	8.6	8.7
		medium text	9.0	8.8
		large text	13.2	12.9
	Media	Foto	36.1	36.5
		Audio	148.9	151.6
		Video	365.0	353.6
	Blog	—	8.6	8.2
GraphQL	Text	small text	7.6	7.4
		medium text	7.7	7.6
		large text	10.1	9.8
	Media	Foto	511.7	490.5
		Audio	5896.9	5658.3
		Video	—	—
	Blog	—	7.6	7.2
gRPC	Text	small text	7.5	7.5
		medium text	8.4	8.3
		large text	18.8	18.8
	Media	Foto	182.0	162.6
		Audio	2372.5	2355.0
		Video	—	—
	Blog	—	7.9	7.8

TextService: Es ist zu erkennen, dass kleinere Textdaten (1kB – 10 kB) von allen Schnittstellen relativ schnell verarbeitet werden konnten. gRPC Web und GraphQL weisen hierbei jedoch die geringsten Antwortzeiten auf (7-8 ms), REST benötigte ca 8-9 ms für kleinere Textdaten. Bei größeren Textmengen von (200 kB) steigt die Latenz erwartungsgemäß bei allen Technologien etwas an, wobei diese bei GraphQL mit 10 ms und REST mit 13 ms deutlich schneller als bei gRPC Web (19 ms) bereitstehen.

MediaService: Besonders Auffällig ist der Leistungsunterschied bei der Übertragung von Mediendaten. Hierbei war entgegen der theoretischen Erwartungen REST die schnellste Technologie für alle Medienarten. Für Bilder (4MB) lag dabei die mittlere Antwortzeit bei 36 ms, deutlich vor gRPC (182 ms) und GraphQL (511 ms). Ähnliches Verhalten zeigte sich bei der Übertragung von Audiodateien (30 MB), hierbei wurde mit REST eine mittlere Antwortzeit von 150 ms gemessen, mit deutlichem Abstand gefolgt von gRPC (2372 mms) und GraphQL (5870 ms). Bei der Übertragung von Videodaten (100 MB) konnte in Chrome keine vergleichbare Messung der Antwortzeiten durchgeführt werden. Die Übertragung war nur über die REST-API erfolgreich. Es ergab sich dabei eine durchschnittliche Antwortzeit von 365 ms. Wegen großer Latenz bzw. Instabilitäten des Clients konnten für GraphQL und Grpc-WEB keine Daten gemessen werden.

BlogService: Bei der Messung der Blog-Datenstrukturen, konnten geringe Unterschiede in den Abfragezeiten zwischen den Technologien identifiziert werden. GraphQL war hierbei mit einer mittleren Latenz von 7.6 ms leicht schneller als gRPC (7.9 ms / 7.8 ms) und REST (8.6 ms).

5.4.0.1 20 parallele Requests

Bei der Durchführung von 20 parallelen Requests wurden jeweils pro API und Service 30 Messwerte (bei MedienService Messwerte) gemessen und anschließend der Durchschnittswert und Median berechnet. Es zeigten sich erwartungsgemäß höhere Latenzen gegenüber den Einzelabfragen.

Tabelle 5.5: Chrome-Client – 20 parallele Requests: Durchschnitt und Median (Antwortzeit in ms)

Technologie	Service	Datentyp	AVG	Median
REST	Text	small text	45.5	44.0
		medium text	61.9	62.0
		large text	92.1	93.6
	Media	Foto	385.8	384.6
		Audio	2420.1	2393.4
		Video	—	—
	Blog	—	53.0	48.3
GraphQL	Text	small text	31.4	29.0
		medium text	35.4	33.4
		large text	71.1	68.7
	Media	Foto	16159.6	15745.7
		Audio	16159.6	—
		Video	—	—
	Blog	—	34.6	33.0
gRPC	Text	small text	33.4	32.1
		medium text	43.5	40.9
		large text	145.3	145.4
	Media	Foto	5736.2	5682.4
		Audio	126026.5	107938.0
		Video	—	—
	Blog	—	34.5	31.3

TextService: Während kleinere Textdaten noch performant verarbeitet werden können, nehmen die Unterschiede bei größeren Lasten stärker zu. Bei sehr kleinen Textdaten von 1 KB sind gRPC und graphql jeweils mit ungefähr 30 ms gleich auf, bei 10 kB ist graphql mit 35 ms ungefähr 9 ms schneller als gRPC mit 44 ms. je größer die Daten werden, desto langsamer wird gRPC. Rest benötigte dabei jeweils 45 ms bzw. 62 ms. Auch bei größeren Textdaten ist graphql mit je 71 ms am schnellsten, gefolgt von REST mit 92 ms und gRPC mit 145 ms.

MediaService: Bei der Verarbeitung von Medien kam es wie bereits durch die einzelabfragen erwartet zu größeren unterschieden. REST schnitt auch hier mit 384 ms für Fotos, 2420 ms für Audiodaten am besten ab. Gefolgt von gRPC mit 5736 ms für das Foto und 126026 ms für die Audiodatei. Bei GraphQL dauerte der Request für die Fotodaten 16159 ms. Für Videodateien bzw. Audiodateien (GraphQL) wurde in dieser Testreihe aufgrund der bereits in den Einzelabfragen instabilen Ladeverhaltens, keine weiteren Messungen vorgenommen.

BlogService: Bei den Abfragen der Blogdaten lagen die Antwortzeiten aller Technologien im zweistelligen ms bereich. Ähnlich wie bei geringen Textdaten, sind gRPC und graphql mit jeweils 34 ms gleichauf, gefolgt von REST mit 53 ms.

5.4.0.2 Browser-Vergleich

Derselbe Versuch mit Einzel-Requests wurde anschließend in zwei weiteren Web Browsern durchgeführt, um festzustellen, ob es bei der Performance der APIs eine Abhängigkeit vom Webbrowser gibt. Bei der Messung wurden jeweils 10 Requests pro Technologie und Service durchgeführt und daraus der Durchschnitt und der Median ermittelt.

Tabelle 5.6: Vergleich WebClient (1 Request) – Chrome, Firefox, Edge (AVG in ms)

Technologie	Service	Datentyp	Chrome	Firefox	Edge
REST	Text	small text	8.6	8.5	4.84
		medium text	9.0	9.3	6.31
		large text	13.2	11.4	9.5
	Media	Foto	36.1	54.4	36.3
		Audio	148.9	248.7	144.9
		Video	365.0	676.4	422.8
	Blog	—	8.6	6.7	7.9
GraphQL	Text	small text	7.6	9.4	5.61
		medium text	7.7	11.1	5.68
		large text	10.1	15.8	8.21
	Media	Foto	511.7	1743.4	402.8
		Audio	5896.9	13253.3	6442.1
		Video	—	90091	—
	Blog	—	7.6	9.6	5.6
gRPC	Text	small text	7.5	9.4	5.5
		medium text	8.4	9.4	5.7
		large text	18.8	24.2	20.3
	Media	Foto	182.0	248.1	186.4
		Audio	2372.5	2455.6	2744.9
		Video	—	8984.8	7984.6
	Blog	—	7.9	8.0	5.2

Textdaten: Bei den Messungen reagierte Edge in allen Schnittstellen mit den niedrigsten Antwortzeiten. Vorallem bei REST und GraphQL konnten deutliche Unterschiede gemessen werden, hierbei hatte REST in Edge für kleine Textdaten im Mittel nur etwa 4-6 ms, während Chrome und Firefox 8-9 ms benötigten. Bei größeren Textmengen blieb Edge mit 9.5 ms bei Rest im Vergleich zu 13 ms in Chrome und 11 ms in Firefox weiterhin am besten. Auch gRPC konnte in Edge am schnellsten verarbeitet werden, wobei bei größere Textdaten sowohl Edge und Chrome 19 ms benötigen und Firefox 24 ms.

Medieninhalte (Foto, Audio, Video) Beim Senden von Mediendaten hatte hatten Chrome und Edge im Gegensatz zu Edge eine ähnlich gute Performance. Bei REST und gRPC konnte Edge und Chrome die kürzesten Antwortzeiten für Fotos (36 ms) und Audiodateien (150 ms) liefern. Bei Firefox lagen diese bei REST bei 55 ms und 250 ms bzw. bei gRP-Web bei 250 ms und 2455 ms.

Bei dem Senden von Videodaten war Chrome am performantesten. Hier hatte REST eine Antwortzeit von 365 ms, Edge 423 ms und Firefox 676 ms. Im Gegensatz zu Chrome, konnten das Video in Firefox mit gRPC (8984 ms) und Edge (7984) und in Firefox auch mit GraphQL (90091 ms), auch wenn sehr langsam, dargestellt werden.

Blogdaten: Ähnliche Ergebnisse wie bei Textdaten: Edge meist am schnellsten, gefolgt von Chrome, dann Firefox.

5.4.0.3 Messungen im Konsolen-Client

Um die Kommunikationsleistung der einzelnen Technologien ohne Einfluss eines Browsers zu ermitteln, und um einen direkten Performancevergleich zwischen gRPC und gRPC-Web zu ermitteln wurden ebenfalls Messungen in der Kommunikation innerhalb einer Microservice basierten Architektur untersucht. Wie erwartet sind die Messwerte in dieser Messung zum größten Teil deutlich besser als zwischen Web-Client und Backend Service.

Tabelle 5.7: Konsole – 1 Request: Durchschnitt und Median (Antwortzeit in ms)

Technologie	Service	Datentyp	AVG	Median
REST	Text	small text	2.3	2.0
		medium text	2.1	2.0
		large text	6.4	7.0
	Media	Foto	45.9	41.5
		Audio	250.4	249.5
		Video	540.2	515.0
	Blog	—	1.0	1.0
GraphQL	Text	small text	2.3	2.0
		medium text	2.2	2.0
		large text	5.5	5.0
	Media	Foto	5716.2	5742.0
		Audio	—	—
		Video	—	—
	Blog	—	2.4	2.0
gRPC-Web	Text	small text	2.2	2.0
		medium text	2.8	3.0
		large text	6.8	7.0
	Media	Foto	51.3	53.0
		Audio	251.4	248.0
		Video	705.1	717.5
	Blog	—	2.9	3.0
gRPC	Text	small text	1.2	1.0
		medium text	1.5	1.5
		large text	4.1	4.0
	Media	Foto	42.7	41.0
		Audio	252.1	249.0
		Video	610.0	615.0
	Blog	—	1.1	1.0

TextService: Alle viel Technologien zeigten bei kleinen und mittleren Textdaten sehr geringe Antwortzeiten. gRPC hatte hier jedoch die schnellste respond Zeit mit nur ungefähr 1 ms. REST, GraphQL und gRPC haben ungefähr die selbe Zeit von 2-3 ms. Auch bei großen Textdaten ist gRPC mit 4.1ms am schnellste, gefolgt von GraphQL mit 5.5 ms, REST mit 6.4 ms und gRPC Web mit 6.8 ms.

MediaService: Bis auf REST, war die Übertragung der Mediadaten im Konsolen-Client schneller als im Web-Client. gRPC hatte mit 43 ms die schnellste Übertragung von Fotos gefolgt von REST mit 46 ms, gRPC Web mit 51 ms und GraphQL mit 5716 ms. Bei den 30 Mb Audiodaten sind REST, gRPC und gRPC-Web gleichauf mit 250 ms. Nur bei großen Binärdaten ist REST mit 540 ms schneller als gRPC (610) und gRPC-Web (705 ms). Für GraphQL konnte keine sinnvolle Messung für Audio oder Fotos durchgeführt werden.

BlogService: Bei den Senden von strukturierten Bloddaten liegen gRPC und REST mit ungefähr 1 ms ungefähr gleich auf, gefolgt von GraphQL mit 2,4 und gRPC-Web mit 2.9 ms.

Fazit der Messungen

Aus den mit den Prototypen durchgeführten Messungen, können einige Annahmen getroffen und Unterschiede aufzeigen. Zu einem großen Teil konnten die im theoretischen Teil beschriebenen Annahmen zu den Unterschieden zwischen REST, GraphQL, gRPC und gRPC-Web bestätigt werden, gleichzeitig wurden einige andere Erkenntnisse hervorgebracht. Folgende Unterschiede bzw. Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

Kapitel 6

Diskussion und Ausblick

6.1 Diskussion

6.2 Zusammenfassung

6.3 Ausblick

Acronyms

[TODO: Add acronyms (abbreviations) and their long version. In the text the first occurrence will show the full description, further occurrences will show the acronym only.]

ABI	Application Binary Interface
DOI	Digital Object Identifier
ISBN	International Standard Book Number
MITM	Man-In-The-Middle
URL	Universal Resource Locator

[TODO: Finally, check the bibliography, because readers must be able to trace back and verify each and every source. Are you sure, that everyone can find the given resources with the information you supplied? Besides author(s), title and year, for books you need the publisher information and the ISBN, for IEEE/ACM research papers add the conference/journal title, location and the DOI.]

Literaturverzeichnis

Amazon Web Services, Inc. (2024). *The difference between frontend and backend explained*. Accessed: 2024-06-09. [online] <https://aws.amazon.com/de/compare/the-difference-between-frontend-and-backend/> (siehe S. 4).

Weiterführende Literatur

- Alkhodary (2022). *Analyse des Backend-for-Frontend Patterns mittels der Technologien gRPC, REST und GraphQL*. To-be-read.
- Ecma International (Dez. 2017). *The JSON Data Interchange Syntax*. Standard, 2nd edition. JSON-Daten-Interchange-Syntax, veröffentlicht Dezember 2017. [online] https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-404_2nd_edition_december_2017.pdf.
- Fielding, R. T. (2000). *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*. https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/rest_arch_style.htm. Accessed: 2024-06-08.
- Google (2024). *Protocol Buffers Documentation*. Accessed: 2024-06-09. [online] <https://protobuf.dev/>.
- GraphQL Foundation (2024). *GraphQL Documentation*. <https://graphql.org/>. Accessed: 2024-06-08.
- gRPC Authors (2024). *gRPC Documentation*. Accessed: 2024-06-08. [online] <https://grpc.io/docs/>.
- Hypertext Transfer Protocol Working Group (2015). *RFC 7540: Hypertext Transfer Protocol Version 2 (HTTP/2)*. <https://httpwg.org/specs/rfc7540.html>. Accessed: 2024-06-08.
- (2022). *RFC 9112: HTTP/1.1*. <https://httpwg.org/specs/rfc9112.html>. Accessed: 2024-06-09.
- Koponen (2024). *Beschäftigt sich mit der Verwendung des RPC-Modells in Web Anwendungen*. To-be-read.
- Kurose, J. F. & K. W. Ross (2021). *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 8. Aufl. Online-PDF über Harsh K. Kapadia, abgerufen Juni 2025. Pearson. ISBN 978-0-13-668155-7. [online] <https://networking.harshkapadia.me/>

[files/books/computer-networking-a-top-down-approach-8th-edition.pdf](#).

Larsson, M. & D. Lindh (2024). „Evaluating the Performance of Serialization Protocols in Apache Kafka“. DiVA id: diva2:1878772. Master’s thesis. Umeå University. [online] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1878772/FULLTEXT01.pdf>.

Omer (2024). *Genereller Vergleich von REST, GraphQL und gRPC*. To-be-read. Vergleichsdaten.

Ruupert Koponen (2024). *Understanding re-emergence of the RPC model in web development*. Accessed: 2024-06-11. [online] https://www.researchgate.net/publication/380547826_Understanding_re-emergence_of_the_RPC_model_in_web_development.

Anhang

A.1 Rohdaten der Messungen

Im folgenden werden die Rohdaten aller durchgeführten Messungen des Prototyps angeführt. Pro Testreihe wurden je API-Technologie, je Service und je Datengröße jeweils 30 Einzelmessungen durchgeführt. Die in den Diagrammen und Tabellen im Haupttext angegebenen Mittel- und Medianwerte wurden aus diesen Daten berechnet.

Tabelle A.1: Rohdaten: Web-Client Einzelrequests – Chrome (Antwortzeit in ms; 30 Messungen je Kombination)

Technologie	Service	Datentyp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
REST	Text	small text	9.2	9.7	8.2	8.7	7.3	7.9	11.9	8.4	9.5	7.4	9.2	10.1	9.4	7.7	9.2	8.7	9.7	9.2	7.5	8.7	7.5	7.9	7.3	8.8	7.4	9.3	7.9	7.7	8.9	7.6
REST	Text	medium text	8.6	7.6	9.6	8.7	7.8	8.8	9.0	7.7	9.8	9.5	8.8	9.0	8.6	8.5	9.8	12.0	9.5	8.0	9.4	7.6	9.2	8.3	8.7	7.9	8.8	7.8	10.0	8.7	8.5	13.9
REST	Text	large text	13.4	15.0	12.2	13.3	12.2	13.5	20.2	14.1	13.9	12.5	12.8	13.0	15.1	11.7	14.1	12.8	14.4	12.2	14.5	14.9	12.3	11.7	11.8	13.1	9.3	12.8	12.3	14.2	11.0	12.3
REST	Media	Foto	22.4	44.4	26.0	34.2	25.1	36.3	32.3	26.7	45.9	30.2	36.8	38.0	36.1	37.3	29.6	40.5	35.2	32.5	41.3	36.6	37.9	40.6	41.0	34.7	35.3	43.5	44.5	34.7	45.8	38.4
REST	Media	Audio	175.3	150.5	130.4	125.0	144.4	148.3	141.4	127.3	129.9	136.8	158.2	156.5	136.8	152.8	139.2	131.7	155.1	155.6	161.5	161.8	174.5	140.5	164.5	152.6	156.6	175.5	155.4	158.7	127.2	143.5
REST	Media	Video	353.2	392.7	399.9	398.6	337.2	341.2	332.7	401.2	373.2	312.8	392.9	343.7	339.8	376.2	351.7	340.6	416.8	405.1	366.4	354.0	372.5	352.8	336.2	386.0	346.6	346.2	342.4	400.3	386.5	351.3
REST	Blog	—	8.2	7.9	7.4	13.9	8.2	8.6	7.8	7.5	8.2	8.5	9.5	7.7	10.2	7.7	10.6	10.3	8.6	8.6	8.7	7.8	10.1	7.8	8.0	9.5	7.7	7.3	8.1	8.7	7.8	7.5
GraphQL	Text	small text	7.5	7.1	5.5	10.2	6.6	6.5	7.5	8.3	6.8	10.9	7.4	7.0	7.4	7.5	7.4	8.6	6.8	6.8	6.6	7.7	7.6	10.6	8.4	7.2	7.8	7.9	6.5	7.4	7.0	8.3
GraphQL	Text	medium text	7.8	7.9	7.4	8.3	9.2	7.7	7.5	7.3	8.4	8.0	7.6	8.1	7.9	10.7	7.4	7.4	7.5	7.8	6.3	7.4	7.6	6.7	7.6	6.6	7.7	8.3	6.7	7.3	7.1	7.4
GraphQL	Text	large text	12.5	10.5	10.8	9.1	11.4	9.5	7.7	10.0	10.8	8.5	11.5	11.0	8.9	10.3	9.4	10.1	9.6	10.5	11.4	7.6	16.4	7.9	10.5	9.2	8.8	13.2	9.1	9.2	9.3	9.1
GraphQL	Media	Foto	378.7	671.5	418.5	391.1	459.3	403.5	534.4	536.3	409.3	589.7	669.9	703.8	657.1	424.3	430.7	353.3	521.7	363.3	665.4	419.6	396.6	442.4	412.4	351.4	602.8	657.1	577.1	665.0	688.6	557.5
GraphQL	Media	Audio	5441.9	6626.5	5337.3	7689.2	7138.3	5708.4	5119.7	6504.3	4999.1	5662.9	5683.2	6117.4	5028.2	5300.6	5138.4	5000.3	5829.4	7507.8	5416.1	5653.7	6113.1	4930.8	5319.7	7180.0	5168.1	5221.8	7857.7	5452.2	6798.7	5961.7
GraphQL	Media	Video	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GraphQL	Blog	—	5.9	7.5	10.7	8.1	7.0	6.7	6.3	6.9	6.3	6.9	8.5	7.1	7.3	10.3	6.3	6.9	8.4	7.7	7.1	7.5	8.0	6.6	7.5	10.7	6.4	7.9	6.7	9.6	9.1	6.4
gRPC	Text	small text	7.2	7.6	7.7	6.8	7.3	7.3	6.9	7.5	10.2	7.5	8.9	7.5	7.9	6.9	7.2	8.5	5.3	7.8	7.6	7.1	11.2	7.6	7.0	6.5	7.4	7.8	6.6	7.6	6.5	6.6
gRPC	Text	medium text	8.2	8.7	8.5	10.5	8.4	8.5	8.0	7.5	7.6	8.8	11.4	8.1	8.3	9.5	7.8	8.3	7.5	8.6	8.7	7.7	9.1	8.2	7.1	8.0	7.3	8.5	8.3	7.0	8.6	7.9
gRPC	Text	large text	16.9	19.7	19.6	21.9	17.6	21.6	19.0	19.2	18.6	17.7	17.2	19.0	15.4	18.8	17.0	20.2	18.2	18.8	18.4	17.7	19.3	22.7	20.1	19.9	16.2	18.8	19.1	22.0	16.8	16.3
gRPC	Media	Foto	128.4	121.1	193.0	125.8	158.4	243.7	160.0	248.2	170.5	182.3	239.6	151.9	278.7	182.4	154.0	158.4	364.9	155.3	277.4	165.2	142.5	156.8	215.6	169.4	165.9	116.3	120.3	148.3	211.3	153.7
gRPC	Media	Audio	2283.3	2643.5	1726.5	2356.3	2366.4	2107.2	1967.7	2393.3	1924.8	2390.3	1974.8	1606.8	2506.9	2374.6	2145.8	2306.7	2575.3	2109.4	2168.8	2501.5	3549.0	3192.8	2165.9	2942.9	2431.4	2425.1	2353.6	2308.2	3079.1	2295.9
gRPC	Media	Video	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
gRPC	Blog	—	7.7	8.3	7.5	7.6	7.8	6.4	7.0	7.7	7.0	8.7	6.7	8.2	6.2	8.1	7.5	11.9	7.9	7.4	8.3	6.8	7.9	7.2	8.1	7.3	8.3	7.8	6.5	7.9	12.3	8.2

Tabelle A.2: Rohdaten: Web-Client *20 parallele Requests* – Chrome (Antwortzeit in ms; bis zu 30 Messungen je Kombination)

Technologie	Service	Datentyp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
REST	Text	small text	45.8	52.4	42.7	30.2	37.6	37.7	35.0	30.7	54.5	38.1	45.3	51.4	33.6	47.8	30.2	76.6	30.4	57.0	59.5	32.4	23.6	69.6	63.1	33.8	42.0	58.2	68.4	51.4	45.6	40.1
REST	Text	medium text	61.7	48.9	55.6	82.8	50.2	84.3	64.0	35.8	63.2	70.7	57.6	52.6	58.3	47.0	83.5	62.2	42.6	49.4	62.4	87.0	68.0	59.7	72.5	41.9	79.1	52.2	67.1	36.9	84.4	74.0
REST	Text	large text	113.6	139.5	100.8	76.7	109.6	94.5	98.7	89.0	84.3	102.4	82.0	79.7	94.0	100.8	98.2	110.3	107.5	69.6	85.3	80.7	87.1	93.2	64.2	96.3	106.0	61.6	83.7	96.1	73.5	84.1
REST	Media	Foto	360.9	453.2	370.0	423.0	415.8	399.2	400.4	362.4	368.5	304.4																				
REST	Media	Audio	2770.0	2400.8	2282.5	2350.9	2391.0	2367.5	2361.6	2450.4	2395.7	2430.4																				
REST	Media	Video																														
REST	Blog	—	72.6	72.2	62.8	39.2	74.6	42.4	42.4	83.6	44.9	30.5	43.9	42.2	60.1	50.6	43.3	69.4	65.5	34.1	60.9	69.6	36.2	39.6	61.0	60.3	32.7	32.7	45.9	40.3	71.9	65.1
GraphQL	Text	small text	26.2	32.8	26.8	26.2	29.1	33.8	43.7	29.9	28.9	33.4	34.8	35.5	31.4	29.5	27.3	30.3	23.7	54.7	26.4	26.3	25.6	27.9	35.2	27.6	28.7	26.0	26.8	46.3	27.4	41.1
GraphQL	Text	medium text	32.3	27.7	35.3	35.6	54.5	39.7	58.5	38.0	28.9	26.1	45.7	39.1	29.1	30.5	33.1	33.6	31.2	27.8	29.0	27.7	49.5	31.8	28.2	30.0	40.9	34.0	33.6	31.2	33.8	44.7
GraphQL	Text	large text	61.2	75.4	59.6	83.2	73.2	64.3	59.0	81.5	72.9	65.9	58.9	82.4	77.5	83.3	69.7	83.3	67.7	53.2	60.4	71.5	85.0	66.9	63.0	62.5	84.3	99.0	64.5	87.6	66.7	50.9
GraphQL	Media	Foto	17657.2	19009.6	16089.2	15402.1	19715.3	14381.0	13484.4	16510.5	14588.1	14758.3																				
GraphQL	Media	Audio																														
GraphQL	Media	Video																														
GraphQL	Blog	—	42.3	68.2	36.3	58.7	32.7	29.2	33.4	38.1	48.2	41.1	35.8	26.5	17.8	35.3	25.4	28.1	29.8	30.2	39.6	27.3	24.4	23.2	29.4	36.6	28.3	43.9	28.7	26.4	33.3	40.0
gRPC	Text	small text	26.4	40.1	28.5	29.3	51.3	39.7	26.4	35.2	30.9	24.4	40.5	33.3	33.4	26.8	21.3	46.9	29.5	17.3	25.3	30.1	38.7	44.3	41.9	30.5	29.5	43.4	39.4	34.1	33.2	30.7
gRPC	Text	medium text	39.5	39.2	46.1	39.2	43.6	65.2	46.6	36.8	42.1	56.4	49.5	36.3	32.3	45.1	35.7	34.7	28.8	35.5	34.6	37.8	45.8	44.9	63.3	65.1	49.7	57.2	48.9	39.6	35.1	30.6
gRPC	Text	large text	135.9	132.6	130.3	145.3	143.8	146.4	121.6	152.5	171.1	128.5	143.2	141.4	156.8	139.6	146.9	148.7	157.8	145.6	147.5	151.6	145.5	145.2	163.5	127.7	132.2	169.1	147.1	141.4	141.1	158.5
gRPC	Media	Foto	5423.3	6538.4	5350.4	5636.5	5728.3	6121.5	5925.4	5520.5	5293.3	5824.7																				
gRPC	Media	Audio	100343.2	101637.3	103693.2	108612.8	161328.4	233593.4	110382.3	107263.2	103128.3	130283.2																				
gRPC	Media	Video																														
gRPC	Blog	—	29.2	30.8	30.4	52.4	34.4	26.2	41.8	31.0	29.2	37.8	35.4	27.8	39.2	31.5	38.6	28.4	39.0	42.4	28.8	39.5	28.2	28.0	36.9	28.2	48.8	30.7	45.3	37.3	29.8	28.6

Tabelle A.3: Rohdaten: Web-Client Einzel-Request Firefox (Antwortzeit in ms; 10 Messungen je Kombination)

Technologie	Service	Datentyp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
REST	Text	small text	8	9	5	3	7	8	12	10	16	7
REST	Text	medium text	8	8	8	9	15	15	8	9	7	6
REST	Text	large text	13	12	10	12	11	10	10	15	10	11
REST	Media	Foto	29	63	43	77	50	49	54	55	56	68
REST	Media	Audio	269	324	222	238	247	243	257	214	224	249
REST	Media	Video	701	649	688	677	702	631	680	648	717	671
REST	Blog	—	7	5	4	7	14	5	6	6	7	6
GraphQL	Text	small text	7	14	7	7	15	10	7	8	11	8
GraphQL	Text	medium text	13	7	8	9	16	12	8	12	10	16
GraphQL	Text	large text	29	15	10	12	11	23	14	19	10	15
GraphQL	Media	Foto	2099	1691	1736	1667	1684	1689	1799	1688	1709	1672
GraphQL	Media	Audio	13638	14587	13308	12725	13592	12436	13036	12866	13221	13124
GraphQL	Media	Video	47634	49843	46806	52938	46273	40856	44876	48937	472374	50373
GraphQL	Blog	—	11	16	7	11	9	7	5	9	14	7
gRPC	Text	small text	11	11	7	8	15	6	13	7	6	10
gRPC	Text	medium text	11	7	9	12	14	9	9	6	7	10
gRPC	Text	large text	11	24	27	28	26	29	26	20	31	20
gRPC	Media	Foto	11	260	265	292	236	277	293	269	321	257
gRPC	Media	Audio	11	2723	2837	2800	2797	2677	2529	3000	2616	2566
gRPC	Media	Video	11	12029	9728	9500	10178	9506	10608	9923	10191	8174
gRPC	Blog	—	11	10	7	6	8	9	7	7	8	7

Tabelle A.4: Rohdaten: Web-Client Einzel-Request Edge (Antwortzeit in ms; 10 Messungen je Kombination)

Technologie	Service	Datentyp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
REST	Text	small text	5.4	5	5.6	4.8	5.4	3.7	4.5	3.7	4.9	5.4
REST	Text	medium text	7.7	5.6	6.6	5.3	6.2	5.6	6	5.9	6.8	7.4
REST	Text	large text	7.2	10.5	9.5	7.6	9.2	9.8	10.3	10.3	11.1	9.5
REST	Media	Foto	36.7	23.4	39	38.1	38.6	53.6	33.8	24.7	35.9	39.1
REST	Media	Audio	159.2	148.8	168.3	136.6	138.9	150.9	128.2	140.4	146.3	131.2
REST	Media	Video	524	342	458.5	466.3	413	384.2	398.8	395.6	373.2	472.3
REST	Blog	—	7.5	8.5	7.4	7.7	8.5	8.4	7.8	8.7	7.2	7.1
GraphQL	Text	small text	5.5	7.7	5.2	6.2	5.2	5.7	5.2	5.5	5.1	4.8
GraphQL	Text	medium text	6.3	4.4	5.1	4.9	6	6	5.5	7.2	5.5	5.9
GraphQL	Text	large text	9.3	8.3	6.5	7	7	12.2	7.4	10.2	6.9	7.3
GraphQL	Media	Foto	376.6	403.9	399.4	389.8	370.5	455	526.2	384.1	355	367
GraphQL	Media	Audio	4803.3	9124	6786	6241.3	6525	6942.1	4940.9	6190.2	5521.3	7346.6
GraphQL	Media	Video	—									
GraphQL	Blog	—	8.5	4.3	5.6	4.1	5.8	4.5	7.9	4.9	5.4	4.9
gRPC	Text	small text	5.4	4	5.7	7.7	5.3	5.1	4.9	5.7	4.4	6.8
gRPC	Text	medium text	7	5.6	6.3	5.7	5.1	4.5	5.9	5.1	6.1	5.6
gRPC	Text	large text	17.7	19.1	25.8	23.9	21.5	23.6	17.3	16.9	16.8	20.5
gRPC	Media	Foto	216.5	172.5	236.7	179.7	215.5	177.9	139.3	174.4	133.1	218.3
gRPC	Media	Audio	4060.4	2417.1	2734.9	2471.9	2219.3	2523.1	2849.8	2518.3	3002.1	2652.4
gRPC	Media	Video	7957.2	8901.1	7430.3	8105.8	7471.8	8650.3	7792.9	7561.1	7745.5	8230.2
gRPC	Blog	—	5	4.8	4.9	5	5	5.5	5	6.4	5.3	5.3

Tabelle A.5: Rohdaten: Konsolen-Client (Microservice) – Einzel-Requests (Antwortzeit in ms; 10 Messungen je Kombination)

Technologie	Service	Datentyp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
REST	Text	small text	2	3	2	3	2	2	2	2	3	2
REST	Text	medium text	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
REST	Text	large text	7	7	7	7	7	10	3	6	6	4
REST	Media	Foto	80	52	39	48	59	34	44	30	37	36
REST	Media	Audio	252	260	298	252	247	282	240	230	213	230
REST	Media	Video	680	688	500	556	481	573	458	530	472	464
REST	Blog	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GraphQL	Text	small text	3	2	2	2	2	2	3	2	2	3
GraphQL	Text	medium text	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3
GraphQL	Text	large text	5	6	5	7	6	5	5	5	4	7
GraphQL	Media	Foto	4658	5972	6171	5790	5694	6102	5611	5591	5966	5607
GraphQL	Media	Audio	—									
GraphQL	Media	Video	—									
GraphQL	Blog	—	3	2	2	2	3	3	2	2	3	2
gRPC-Web	Text	small text	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2
gRPC-Web	Text	medium text	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3
gRPC-Web	Text	large text	7	7	6	7	7	7	7	6	7	7
gRPC-Web	Media	Foto	55	50	40	37	53	55	53	53	69	48
gRPC-Web	Media	Audio	267	238	254	263	245	244	275	236	251	241
gRPC-Web	Media	Video	625	649	696	729	745	750	717	718	702	720
gRPC-Web	Blog	—	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
gRPC	Text	small text	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
gRPC	Text	medium text	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1
gRPC	Text	large text	3	4	4	4	4	4	4	5	5	4
gRPC	Media	Foto	38	40	52	38	44	43	40	39	51	42
gRPC	Media	Audio	217	248	292	241	257	243	250	238	251	284
gRPC	Media	Video	624	609	632	621	605	582	625	583	589	630
gRPC	Blog	—	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1